

20
20

**GELECEĞİN DÜNYASINDA
BİLİMSEL VE MESLEKİ
ÇALIŞMALAR**

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / I

EDİTÖRLER

PROF. DR. UĞUR ÇAVDAR

DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER

DR. ÖĞR. ÜYESİ PINAR SARI ÇAVDAR

DR. ÖĞR. ÜYESİ FEYZA GÜRBÜZ

ARŞ. GÖR. DR. CANAN BAŞLAK

EKİN 
Basım Yayın Dağıtım

**GELECEĞİN DÜNYASINDA
BİLİMSEL VE MESLEKİ ÇALIŞMALAR
2020
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / I**

EDİTÖRLER

PROF. DR. UĞUR ÇAVDAR
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER
DR. ÖĞR. ÜYESİ PINAR SARI ÇAVDAR
DR. ÖĞR. ÜYESİ FEYZA GÜRBÜZ
ARŞ. GÖR. DR. CANAN BAŞLAK

MART 2020
BURSA / TÜRKİYE

EKİN 
Basım Yayın Dağıtım

Editörler

PROF. DR. UĞUR ÇAVDAR
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER
DR. ÖĞR. ÜYESİ PINAR SARI ÇAVDAR
DR. ÖĞR. ÜYESİ FEYZA GÜRBÜZ
ARŞ. GÖR. DR. CANAN BAŞLAK

Birinci Baskı • © Mart 2020 / Bursa

ISBN • 978-625-7983-91-4

© copyright

All Rights Reserved

Ekin Basım Yayın Dağıtım

Tel: 0224 223 04 37

Mail: info@ekinyayinevi.com

Web: www.ekinyayinevi.com

Adres: Şhreküstü Mahallesi Cumhuriyet Caddesi
Durak Sokak No:2 Osmangazi - Bursa

EKİN 
Basım Yayın Dağıtım

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
HİDROTHERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ.....	1
1. GİRİŞ.....	1
2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER	4
2.1. Kimyasallar	4
2.2. Zeolit X Sentezi	4
2.3. Malzemelerin Karakterizasyonu	5
2.4. TGK Teorisi	5
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	6
3.1. XRF Analizleri	7
3.2. X Işını Difraksiyonu.....	7
3.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi.....	8
3.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	9
3.5. Morfolojik Analiz (FESEM)	10
3.6. TGA Analizi	10
3.7. TGK ve Hammett İndikatörleri Kullanılarak Amin Titrasyonu ile Asit Miktarı Tayini	11
4. SONUÇLAR	13
5. KAYNAKÇA	14
PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA.....	18
1. GİRİŞ.....	18
2. ÜLKEMİZDE VE DÜNYADA PERAKENDE SEKTÖRÜ	18
3. TEDARİKÇİ SEÇİM KRİTERLERİ VE YÖNTEMLERİ.....	19
3.1. METOD: Bulanık Topsis Yöntemi	21
4. UYGULAMA.....	24
5. SONUÇLAR	35
6. KAYNAKÇA	36
BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	40
1. GİRİŞ.....	40
2. MATERYAL VE YÖNTEM	42
2.1. BWM.....	43
2.2. EDAS	44
3. BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN S&T REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47

3.1. BWM Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi	48
3.2. EDAS Yöntemi ile Ülkelerin Karşılaştırılması	50
4. SONUÇLAR	58
5. KAYNAKÇA	58
LOJİSTİK REKABET GÜCÜNÜN BWM-MABAC YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
1. GİRİŞ.....	61
2. MATERYAL VE YÖNTEM	62
2.1. BWM.....	63
2.2. MABAC	64
3. BWM-MABAC İLE OECD ÜLKELERİNİN LOJİSTİK REKABET GÜCÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	68
3.1. Lojistik Rekabet Gücü İçin Veri Kümesi ve Kriterler	68
3.2. Kriter Ağırlıklarının BWM Yöntemi ile Elde Edilmesi	71
3.3. OECD Ülkelerinin MABAC Yöntemi ile Değerlendirilmesi.....	73
4. SONUÇLAR	78
5. KAYNAKÇA	78
SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ.....	81
1. GİRİŞ.....	81
2. SANAL GERÇEKLİK.....	82
2.1. Sanal Gerçeklik Nedir?	82
2.2. Sanal Gerçekliğin Tarihsel Gelişimi	82
2.3. Sanal Gerçeklik Türleri ve Sistemleri	83
2.4. Sanal Gerçekliğin Eğitimdeki Yeri ve Önemi	84
2.5. İş Güvenliğinde Sanal Gerçeklik Uygulamaları	85
3. GEREÇ YÖNTEM	86
4. BULGULAR	86
5. TARTIŞMA	113
6. SONUÇLAR	117
7. KAYNAKÇA	118
KAPLAMA ENDÜSTRİSİNDE EPOKSİ REÇİNE VE SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI	121
1. GİRİŞ.....	121
2. BOYA KAPLAMALAR.....	122
3. REÇİNELER.....	126
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	132
5. SONUÇLAR	135
6. KAYNAKÇA	136

ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE ELEKTRİK-GAZ DÖNÜŞÜM	TEKNOLOJİLERİNİN ENTEGRASYONU.....	138
1. GİRİŞ.....		138
2. İLGİLİ TEKNOLOJİLERE GENEL BİR BAKIŞ		142
2.1. PtG Santrali		142
2.2. Karbondioksit (CO ₂) Üretimi		142
2.3. Hidrojen Sıkıştırma ve Depolama.....		143
3. ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE PTG TEKNOLOJİSİ		143
3.1. Elektrik Üretim.....		143
3.2. Elektrik İletimi.....		146
3.3. Elektrik Dağıtım		149
3.4. Nihai Kullanıcı		149
4. SONUÇLAR		150
5. KAYNAKÇA		151
POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN	SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI.....	155
1. GİRİŞ.....		155
2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU		156
3. DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI (DGA)		158
4. SAYISAL UYGULAMALAR.....		159
4.1. Pompayla Doldurmalı Hidrolik Üretim Birimi Devre Dışı		160
4.2. Pompayla Doldurmalı Hidrolik Üretim Birimi Devrede		165
5. SONUÇ.....		170
6. KAYNAKÇA		170
AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ	ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU.....	172
1. GİRİŞ.....		172
2. PROJE YÖNETİMİNDE ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYON ETMENLERİ		173
2.1. Proje Yönetiminde Organizasyon Etmeni		173
2.2. Proje Yönetiminde Standardizasyon Etmeni.....		176
3. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM.....		179
3.1. Çalışma Yöntemi		179
3.2. Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası		179
4. BULGULAR.....		182
4.1. Organizasyon Etmeni ile İlgili Bulgular		182
4.2. Standardizasyon Etmeni ile İlgili Bulgular		184
5. SONUÇ.....		187
6. KAYNAKÇA		188

TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMIYLA PROTEZ TASARIMI	190
1. GİRİŞ.....	190
2. TERSİNE MÜHENDİSLİK.....	191
2.1. Veri Toplama.....	192
2.2. Ön İşlem -Çokgenleştirme/Poligonlaştırma	194
2.3. Ayrıntılandırma - Parçalara Ayırma Ve Yüzey Ayarlamaları	194
2.4. CAD Modeli Oluşturma.....	195
2.5. Hızlı Prototipleme.....	195
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	195
3.1. Yöntem.....	195
3.2. Malzeme.....	198
4. SONUÇLAR	198
5. TARTIŞMA	204
6. KAYNAKÇA	204
FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ	207
.....
1. GİRİŞ.....	207
2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER.....	208
2.1. Tanım	208
2.2. FDM'in Sınıflandırılması.....	209
2.3. FDM'in Üretilmesi.....	211
3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ.....	213
3.1. SKY ile Üretilen Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	217
4. SONUÇLAR	224
5. KAYNAKÇA	224
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN	227
MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ.....	227
1. GİRİŞ.....	227
2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	228
2.1. Magnezyum	228
2.2. Magnezyum Alaşimleri ve Kullanım Alanları.....	231
2.3. Magnezyum Alaşımalarının Ergitilmesi ve Dökümü	236
3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ	236
3.1. Homojenleştirme Isıl İşlemi	236
3.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi	237
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	239
4.1. Malzeme.....	239
4.2. Ergitme ve Döküm.....	239

4.3. Kalıp.....	240
4.4. Isıl İşlem Uygulaması	241
4.5. Mikroyapı.....	241
4.6. Sertlik.....	241
5. SONUÇLAR	241
5.1. Mikroyapı Sonuçları	242
5.2. Sertlik Sonuçları	250
6. SONUÇLAR	251
7. KAYNAKÇA.....	251
BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ.....	255
1. GİRİŞ.....	255
2. PVD(FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) Kaplama Tekniği	257
2.1. Giriş	257
2.2. PVD Kaplama Tekniği.....	257
3. DLC FİLMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	257
4. DLC FİMLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞI.....	263
5. SONUÇLAR	268
6. KAYNAKÇA.....	269

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ceyda Bilgiç*, Özge Kanık

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 26480
Eskişehir/TÜRKİYE

cbilgic@ogu.edu.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Zeolit yapısı tipinin atlası Uluslararası Zeolit Birliğinin (IZA, International Zeolite Association) bir yayımıdır (IZA). Bu atlaslar IZA yapı komisyonu yayımıdır ve sık sık güncellenmektedir. Zeolitlerin kafes şeklindeki kristal yapıları, köşe paylaşımli dört yüzlü (tetrahedral) birimlerinden oluşmaktadır. Daha sonra, IZA yapı komisyonu, kafes çalışma veritabanının kolay yönetimi için kompozisyonundan bağımsız olarak kafes topolojisi temeline dayalı kodlama yapmıştır. Bu kodlama sistemine göre örneğin FAU [fujasit topolojisine sahip moleküler elekler], LTA [Linde zeolit A tipi] MFI [ZSM-5 ve Silikalit için], MOR [mordenit topolojisine sahip olanlar için], ve AFI [alümina fosfat $AlPO_4-5$ yapısı için] kullanılmıştır (Nozue ve diğ., 2012:73; Petrik ve diğ., 2012:1).

Zeolitler, tetrahedral $[SiO_4]^{4-}$ ve $[AlO_4]^{5-}$ üç boyutlu ağından oluşan kristalimsi, hidratlanmış alüminosilikat yapıdadır. Bugün hem doğal hem de sentetik olarak 150'den fazla farklı zeolit ve zeolit benzeri yapı bilinmektedir. Kimyasal kompozisyonları çok benzer olmasına rağmen her bir zeolit türü kendi özel kristal yapısına sahiptir. Çoğu yapılar basit geometrik şekilde birleşmiş SiO_4 , AlO_4 tetrahedralleri olarak görülür. Katyonların kanal içinde yer değiştirebilmeleri zeolitlere 'moleküler elek' özelliği kazandırır. Bu kanallar tetrahedrallerin birleşmesinden oluşan çok yüzeylilerin (polihedron) üç yönlü bağlanması şeklindedir. Zeolitlerin gözenek boyutları kristal yapılarına ve bir dereceye kadar da içerdikleri katyonlara bağlıdır. Çoğu zeolit de kristal yapı Si-O-Al atomlarının meydana getirdiği halkalarla bağlanmış gözeneklerden oluşur. Bu halkaların oluşturduğu geçit pencere olarak adlandırılır ve pencere boyutu halkalardaki atom sayısı ile orantılıdır.

Zeolitlerin genel formülü: $M_x/n[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot wH_2O$ olarak ifade edilir.

Burada n, M katyonunun değeridir, w, birim hücre başına su molekülü sayısıdır, x ve y, birim hücre başına toplam tetrahedral atom sayısıdır. y/x oranı (Si/Al oranı) genellikle 1 ile 5 veya yüksek silika zeolitleri için 10 ile 100 arasındadır.

Kafes yapısı, katyonlar ve su molekülleri tarafından işgal edilen, kanalları ve ara boşlukları içerir. Bu katyonlar hareketlidir ve düzenli biçimde iyon değişimini gerçekleştirirler. Yüzey suyu, hacimce %50'lere varan bir oranda, kafes içinde bulunmasına rağmen, ısıtılarak, kafese zarar vermeden yapıdan uzaklaştırılabilir ve tersinir olarak yapıya alınabilir. Gözenekli yapı ve geniş yüzey alanına sahip üç boyutlu bu kafes yapısı zeolit minerallerine teknolojik ve ticari önem kazandıran özelliklerin başında gelmektedir.

Sentetik zeolit üretimini amaçlayan ilk çalışmalarda, doğal zeolitlerin oluşturduğu jeotermal koşullarda olduğu gibi yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta sentez çalışmaları yapılmıştır. Ancak zeolit A, X ve Y'nin sentezlerinin atmosfer basıncında ve 100 °C'ı geçmeyen sıcaklıklarda gerçekleştirilebildiği, 1955-1965 yılları arasında yapılan çalışmalarda bulunmuştur. Böylesine uygun sentez koşullarında üretilebilen ve doğal eşdeğerleri olmayan zeolit A, X ve Y'nin geniş kullanım alanları bulabilmesi molekül eleği endüstrisinin hızla gelişmesini sağlamıştır. Yüksek sıcaklıklarda üretilen zeolitler üzerinde çalışmalar süregelmektedir, ancak bugün de sentetik molekül eleği

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

endüstrisinin temel ürünleri, uygun sentez koşullarında üretilebilen zeolit A, X ve Y olmaya devam etmektedir.

Sentetik X-tipi zeolit, doğal olarak oluşan fujasit yapıya sahiptir ve nadir görülen bir mineraldir. Genel formülü, $M_{n/x}(AlO_2)_n(SiO_2)_{192-n}$ 'dir, burada $n = 77-96$ ve $x = M$ 'nin değeridir. Fujasit yapısı, altıgen prizmalar veya çift altılı halkaların (D6R) birimlerle bağlanan on kafesten oluşur. β -kafes genellikle sodalit kafesleri olarak adlandırılır çünkü zeolit sodalitin yapısı, dört halka aracılığıyla birbirine bağlanan bu kesilmiş oktahedradan sekizini içerir. Üç boyutlu gözenek sistemi içeren kristal yapıda bulunan geniş boşluk süper kafes olarak da adlandırılmaktadır. Değişebilir katyonu sodyum olan NaX, $6,7 \text{ \AA}$ gözenek açıklığına ve 13 \AA boşluk çapına sahiptir. Bu boyutlar sadece belirli moleküllerin zeolit tarafından adsorbe edilmesine izin verir (Wajima ve diğ., 2009:2983; Huang ve diğ., 2009: 969). Zeolit X kafesi $1,0 < Si/Al < 1,5$ arasında bir Si/Al oranına sahiptir. Lowenstein kuralı nedeniyle, kararsız kafes yapısına sahip olacağından, Si/Al oranı 1,0 den daha az olan bir fujasit hazırlanmamıştır. Zeolit NaX için boşluk kesri 0.50 ve NaY için 0.48'dir. Zeolit X'in kimyasal formülü $[Na_{88}(H_2O)_{220}] [Si_{104}Al_{88}O_{384}]$ şeklindedir (Ribeiro ve diğ., 1984; Sebastian ve diğ., 2006:208; Ferreira ve diğ., 2012:208).

Xu ve diğ. (Xu ve diğ., 2008:73) zeolitlerin ve diğer benzer malzemelerin eşsiz iyon değişiminin ve katalitik özelliklerinin temel olarak bu katyon hareketliliğinin bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Gougazeh ve Buhl (Gougazeh ve Buhl, 2014:35), zeolit endüstriyel uygulamaya uygun olarak sentezlenmesinin önemini vurgulamışlardır. Zeolitlerin uygun formlarda sentezi, endüstriyel uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Günümüzde kristalli ürünlerin saflığı ve parçacık boyutlarının homojenliği nedeniyle, sentetik zeolitler ticari olarak doğal zeolitlerden daha sık kullanılmaktadır (Meng ve diğ., 2016: 3; Petrov ve Michalev, 2012:30; McCusker ve diğ., 2003:381).

Silika ve alümina kimyasal kaynaklarından sentetik zeolitlerin hazırlanması pahalıdır, ancak endüstriyel uygulamalar ve bilimsel amaçlar için hassas bir şekilde tasarlanmış kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip yüksek saflıkta malzemeler üretme avantajına sahiptir. Hidrotermal sentez; reaktanların yüksek reaktivitesi, düşük enerji tüketimi, düşük hava kirliliği, kolay kontrol edilebilen çözelti, metastabil fazlar ve benzersiz yoğunlaştırılmış fazlar gibi bazı avantajlar sağlar (Zhou ve diğ., 2013: 15596; Kamali ve diğ., 2009:52). Bu nedenle alüminosilikat zeolitler genellikle hidrotermal koşullar altında sentezlenir (Cundy ve Cox, 2003:663; Cundy ve Cox, 2005:1)

Cundy ve Cox (Cundy ve Cox, 2003:663; Cundy ve Cox, 2005:1) hidrotermal sürecin birçok zeolit ve zeotip için ana sentez yolu olduğunu ileri sürmüşlerdir. Zeolit X kataliz, sorpsiyon ve membran ayrılmasında birçok uygulamada önemli bir endüstriyel malzemedir (Mohammadi, 2008:9; Chandrasekhar ve Pramada, 2008:152). Gazların ve organik bileşenlerin saflaştırma ve ayrıştırma işlemlerinde yaygın bir uygulama bulmuştur. İyi iyon değişim kapasitesi nedeniyle, bazen deterjan üretiminde katkı maddesi olarak kullanılır (Chandrasekhar ve Pramada, 2008:152). Zeolitlerin asitlik karakterizasyonu, çeşitli hidrokarbon reaksiyonları için katalitik potansiyellerini göstermektedir (Khan ve diğ., 2010: 303; Vu ve diğ., 2014:712). Asitlik karakterizasyonu sırasında Brønsted ve Lewis asit tipini, asit tip kuvvetini, konsantrasyonunu ve asit bölgelerinin yerini belirlemek de çok önemlidir. Bununla birlikte, yüzey asitliğini etkileyen faktörler şunları içerir: Si/Al oranı, kristalleşme sıcaklığı, kristalleşme süresi ve adsorpsiyon süresi. Si/Al oranı zeolitlerin asitliğini etkiler, bu nedenle Si/Al oranı azaldıkça toplam asit bölgesi sayısı artar, fakat aynı zamanda asitlik zayıflar (Bugaev ve diğ., 2005:10771).

Endüstriyel hammaddelerin haricinde endüstriyel ürünlerin de çoğunu oluşturan katı maddelerin kullanım alanlarının geliştirilebilmesi için yüzey özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Katı yüzeyler için asit-baz tanımında, Bronsted ve Lewis asit-baz tanımı yapılmaktadır. Bronsted tanımı; kendisiyle bir reaksiyon gerçekleştiren maddeye proton veren madde asit, proton alan madde ise baz olarak adlandırılmaktadır. Bu reaksiyon sonucunda proton veren asit Bronsted bazına dönüşürken proton alabilen baz ise Bronsted asidine dönüşmektedir. Aynı maddenin farklı asit ve baz yapıları Bronsted asit-baz çiftini oluşturur. Asit ve baz için verilen en genel tanım olan Lewis hipotezine göre kimyasal reaksiyon gerçekleştiren iki maddeden elektron boşluğu bulunan ve elektron çiftini kabul eden malzeme asit, elektron çifti bulduran ve elektron çifti verebilen madde bazdır. Buradaki iki

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

çeşit teori, daha çok zeolitlerin katıldığı heterojen katalizli tepkimelerdeki katalizör yüzeyinin asidik ya da bazik özelliklerinin belirlenebilmesi için ayrılmayan bir ikilidir. (Erbil, 2006)

Katı asitlerin katalizlendiği, endüstriyel alanda önemi çok büyük reaksiyonlar arasında, hidrokarbonların izomerleşmesi, alifatik ve aromatik hidrokarbonların olefinler ile birlikte alkillenmesi, olefinlerin polimerleşmesi, hidrokarbon malzemelerin kreakingi sayılabilir (Strzemieska ve diğ., 2012:106). Katı baz kataliz destekli hidrokarbon reaksiyonlarına birkaç örnek olarak, basit olefinlerin çift bağ izomerleşmesi, aromatik hidrokarbonların olefinler ile alkillenmesi, katılma ve eliminasyon reaksiyonları, olefinlerin dimerleşmesi ve oligomerleşmesi verilebilir (Sheldon ve diğ., 2007). Katı asit ve baz maddelerin katalizör ya da katalizör destek maddesi şeklinde kullanılmalarında katalizörün katalitik aktivitesi, diğer yüzey özelliklerinin yanında katı yüzey asit ve baz özellikleri ile önemli oranda değişmektedir.

Katalizörler homojen ve heterojen olarak iki bölümde sınıflandırılır. Heterojen katalizli tepkimelerde katalizör ve reaksiyona giren malzemeler farklı fazlardadır. Reaksiyona girenler genelde gaz veya sıvı fazda olduklarından, katalizör çoğunlukla katı fazdadır. Birçok katının katalizör şeklinde kullanıldığı kimyasal tepkimelerde, reaksiyona giren maddeler bazik karakterdeyse, kullanılan katalizör asidik, reaksiyona giren maddeler asidik karakterdeyse kullanılan katalizör bazik karakterde olmalıdır. Bu sebeple endüstriyel proseslerin %75'inde kullanılan ve kullanımı da gittikçe artan heterojen katalizörlerin, asidik özelliklerde mi, yoksa bazik özelliklerde mi olduğunun belirlenmesi oldukça önemlidir.

Katıların yüzey özellikleri bir hayli karışık ve anlaşılması oldukça zor bir konudur. Tek bir teknik, katılarda yüzey kimyasının tümüyle belirlenmesinde yeterli değildir. Farklı yöntemler kullanılarak katıların yüzey özelliklerinin durumunda farklı bilgiler sağlanabilir. Katı yüzey üzerinde bazik ve asidik alanların miktarını, yapısını, kuvvetini ve reaktivitesini kavrayabilmek üzere farklı tekniklerden sağlanan bilgilerin birleştirilmesi gerekir. Yüzey asitlik ve bazlığın belirlenmesinde, farklı pKa değerlerinde bazik indikatörlerin kullanıldığı titrasyon yöntemi ile termodinamik yöntem (TGG) birleştirildiğinde; katı yüzeyin kimyasal bileşimi, asit ve baz alanların dağılımı, katı yüzeylerin etkileşimleri sonucunda meydana gelen bileşimler arasındaki ilişkiler ile ilgili bilgi sağlar. Geleneksel bir yöntem olarak bilinen Hammett indikatör boya adsorpsiyonu methodu katıların ve de iyonik çözeltilerin asidik ve bazik kuvvetlerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmaktadır (Sun ve diğ., 2003:99). Bazik indikatör her bir molekül başına bir proton ekleyebilen nötral madde şeklinde tanımlanır. Pratikte, toz haldeki katı malzeme, benzen, sikloheksan, petrol eteri gibi nötral çözücüye eklenir. Daha sonra üzerine çeşitli organik indikatörler eklenir. Katının asidik kuvveti, adsorplanan baz yüzeyini, konjüge asit formuna dönüştüren kuvvet olarak tanımlanır. Bu da indikatörün renk değişiminden anlaşılır. Benzer şekilde bazik kuvvet; adsorplanan asit yüzeyini konjüge baz formuna dönüştüren kuvvet olarak tanımlanır, bu da indikatörün renk değişiminden anlaşılır. Böylece hem asitlik hem bazlık aynı skalada açıklanır bir de asit indikatör gerekli değildir (Tanabe, 1970).

Ji ve diğerleri, CO₂ yakalama emiciliği için bir ölçüt olan Zeolit 13X'i, katı atık uçucu küllerden hidrotermal işleme ilave bir silika veya alümin kaynağı eklenmeden sentezlemiştir. Hazırlanan zeolit 13X, XRD, XRF ve TEM ile karakterize edilmiştir. Zeolit 13X'in CO₂ adsorpsiyon performansı, termogravimetrik analiz kullanılarak incelenmiştir. Zeolit 13X, 0,35 cm³/g mikrogözenek hacmine sahip 643 m²/g'lik bir yüksek BET yüzey alanı göstermiştir ve 25 ° C ve normal atmosferde yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesi (223 mg/g) vermiştir. Bu arada, hazırlanan zeolit 13X, stabil CO₂ adsorpsiyon / desorpsiyon yenilenebilirliği göstermiştir. Sonuçlar, bu çevre dostu ve uygun maliyetli yöntemle sentezlenen zeolit 13X'in, düşük sıcaklıkta CO₂ adsorpsiyonu için yüksek adsorblama kapasitesi, hızlı sorpsiyon / desorpsiyon oranı, sonsuz yenilenebilirlik ve düşük maliyetli gibi üstün özellikleri bakımından potansiyel uygulamasına sahip olduğunu göstermiştir (Ji ve diğ., 2016:7853).

Corma yaptığı çalışmada zeolitlerde Bronsted- Lewis asitliğini incelemiş, zeolitlerin yüzey asit-bazlığı üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yaptığı bu çalışmalar sonucunda zeolit yüzeylerin asit özelliği göstermesinin petrol üretim tesislerinde kullanılabilecek çok önemli bir özellik olduğu kanısına varmıştır (Corma, 1997).

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Diaz ve arkadaşları, çalışmalarında zeolit 13X ve 5A üzerindeki çeşitli hidrokarbonların adsorpsiyon özelliklerini (adsorpsiyon entalpi, serbest adsorpsiyon enerjisi ve aynı zamanda serbest adsorpsiyon enerjisinin spesifik bileşenleri) TGC (IGC) ile değerlendirmiştir. Moleküler çapın entalpi üzerindeki etkileri ile spesifik etkileşimin parametresi arasındaki paralellik, aynı sayıda karbon atomuna sahip hidrokarbon serileri için bulunmuştur. Polar bileşikler için, dipolar moment kalorimetrik ve kromatografik veriler arasındaki ilişkide anahtar rol oynamaktadır (Diaz ve diğ., 2005:9).

Bu çalışmada, zeolit X hidrotermal olarak sentezlenmiştir. Sentezlenen zeolit X, X-Işını Floresansı (XRF), X-Işını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Ters Gaz Kromatografisi (TGC) ile karakterize edildi. Zeolit X'in yüzey asitliği, TGC ve Hammett *n*butilamin titrasyon yöntemi ile araştırıldı. Lewis asitlik-bazlık parametreleri ve spesifik etkileşim parametreleri, TGC tarafından elde edilen alıkonma hacmi verileri değerlendirilerek belirlenmiştir. Öte yandan, katı bir yüzey üzerindeki asit yerlerinin miktarı, asit kuvveti amin titrasyonu ile ölçüldükten sonra belirlenebilir. Amin titrasyon yönteminde indikatörler kullanılır ve yüzeye adsorbe edilen uygun indikatörün rengi asit kuvvetlerinin ölçüsünü verecektir. Bu çalışmada, K_A ve K_D parametreleri için elde edilen değerlerden, zeolit X yüzeyinin asidik karakterli olduğu anlaşıldı. Zeolit X'in termal kararlılığı, sıcaklık artırılarak elde edilen TGA-DTA eğrilerinin değerlendirilmesi ile incelenmiştir. Zeolit X'in termal analizi, zeolitlerin dehidrasyonu ve termal kararlılığı hakkında değerli bilgiler sağlayabilir.

2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

2.1. Kimyasallar

Zeolit sentezinde, alümina kaynağı olarak sodyum alüminat (ağırlıkça %50-56 Al_2O_3 , ağırlıkça %37-45 Na_2O , Sigma Aldrich), silika kaynağı olarak sodyum silikat çözeltisi (su içinde ağırlıkça % 40 SiO_2 süspansiyonu, Merck) ve sodyum kaynağı olarak NaOH tozu (ağırlıkça > %97, Acros) kullanıldı. Zeolit sentezinde ve karakterizasyonunda teflon astarlı paslanmaz çelik otoklav ve deiyonize su (DI) kullanıldı. TGC analizinde, kullanılan polar probalar oktan, nonan ve dekan. Kullanılan apolar probalar aseton (AC), dietileter (DEE), triklorometan (TCM) ve etil asetat (Et.Ac.). Bu kimyasalların tümü analitik reaktif derecesinde ve daha fazla saflaştırılmadan kullanıldı. Kullanılan Hammett indikatörleri; nötr kırmızı, metil kırmızı, p-dimetilaminazobenzen, timol mavisidir. Bunların pKa değerleri; sırasıyla 6,8, 4,8, 3,3 ve 2,8'dir. Bunların asit renkleri kırmızı, bazik renkleri sarıdır. Benzen, petrol eteri, n-butilamin gibi diğer kimyasallar Merck ve Fluka reaktif sınıflarından temin edildi.

2.2. Zeolit X Sentezi

X tipi zeolit, sırasıyla silikat ve alüminat kaynakları olarak sodyum alüminat kullanılarak hidrotermal olarak sentezlendi. Zeolit jel bileşimi şu şekilde hazırlanmıştır: 17 Na_2O : Al_2O_3 : 8 SiO_2 :666 H_2O (Robson ve diğ., 2001). Sentez jel hazırlığı için önce NaOH deiyonize su içinde çözüldü. Bu çözeltinin yarısına sodyum alüminat ilave edildi. Sodyum hidroksit çözeltisinin diğer yarısına sodyum silikat ilave edildi. Her iki öncü çözelti manyetik olarak iyice karıştırıldı. Çözünme tamamlandıktan sonra iki öncü çözelti birlikte karıştırıldı ve sentez jeli oluştu. Karışım, Teflon otoklavında kapak sıkıca kapatılarak 16 saat boyunca 90°C'deki sıcaklıkta zeolit X'in hidrotermal kristalizasyonu için etüve konuldu. Çözelti daha sonra 30°C'nin altına soğutuldu. Sentez süresi tamamlandı, çözeltinin katı çökeltisi süzülerek geri kazanıldı. Filtrelenen ürünler, filtratın pH'ı yaklaşık 8.0 olana kadar deiyonize su ile yıkandı. Son olarak, numune gece boyunca 100 ° C'de kurutuldu. Daha sonra elde edilen zeolit X, 6 saat boyunca hava sirkülasyonu ile bir fırında 800 ° C'de kalsine edildi.

2.3. Malzemelerin Karakterizasyonu

Sentezlenen zeolit X ürününün numunesi, XRF (X-Işını Floresan PAN analitik, Tip: Minipal 4) ile karakterize edildi. Tablo 1'de , zeolit X'in kimyasal bileşimini listelemektedir. XRD modelleri, $2\theta = 5-80^\circ$ açı aralığına sahip $\text{CuK}\alpha$ dalga boyu $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$ kullanılarak X-Işını Kırınım Pan analitik Empryan tekniği ile kaydedildi. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrumları (FTIR), KBr tekniği ile $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde bir Perkin Elmer FTIR spektrometresi kullanılarak elde edildi. Katı fazların morfolojik yapısı taramalı elektron mikroskopisi (SEM) (Hitachi Regulus 8230) ile incelendi ve mineral fazların kimyasal bileşimi, bir elektron enerji dağıtıcı spektrometre (EDS) modu kullanılarak incelendi. Termogravimetrik analizler (TGA), Perkin Elmer Pyris 1 termoanalizörü (Waltham, MA, ABD) kullanarak 30° C ile 1100° C arasındaki $10^\circ \text{ C} / \text{ dakika}$ tarama hızında gerçekleştirildi. Bu analizler ESOGU' nun merkezi araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kromatografik deneyler, bir alev iyonizasyon detektörü (FID) ile donatılmış Agilent 7890 gaz kromatografisi ile gerçekleştirilmiştir. $40 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ akış hızına sahip taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta azot kullanıldı. TGK ölçümleri $150-180^\circ \text{ C}$ sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Vakum yardımıyla paslanmaz çelik kolona (2.00 m uzunluğunda, 5.35 mm I.D.) yaklaşık 3 g $150-200 \mu\text{m}$ numune parçacıkları dolduruldu. Paslanmaz çelik kolon numune ile doldurulmadan önce metanol ve aseton ile yıkandı. Adsorbanlar, ölçümlerden önce 4 saat boyunca azot gazı akışındaki en yüksek sıcaklıklarda şartlandırıldı. Ölü hacmi belirlemek için metan kullanıldı. Net alıkonma hacminin (V_N) belirlenmesinde en az dört sıcaklıkta enjeksiyonlar yapıldı. Hammett indikatörleri kullanılarak amin titrasyonu ile asit miktarı tespiti uyarlanmış antititrasyon yöntemine, yerleştirme yöntemine ve ultrasonik banyo kullanılarak yapılmıştır (Wang ve diğ.,2006:325). Hammett indikatörleri, uygun indikatörlerin adsorbe formunun rengi için kullanıldı. Bu renk gözlemlerine göre nötr kırmızı (pKa: 6,8), metil kırmızı (pKa: 4,8), p-dimetilaminazobenzen (pKa: 3,3), timol mavisi (pKa: 2,8) indikatörleri kullanılmıştır. Asit renkleri kırmızı, bazik renkleri sarıdır. Katı yüzeyin toplam asit miktarı, renk değişimi gözlenen numunelerin mmol g^{-1} değerlerinin toplamına eşittir.

2.4. TGK Teorisi

Katıların yüzeyleri aktifliğine, asit-baz özelliklerine, yüzey alanlarına ve gözenekliliklerine göre karakterize edilir. Bu özelliklerin hemen hemen hepsi ters gaz kromatografisi ile ölçülebilir. TGK, katıların yüzey enerjileri ve asit-baz özelliklerinin çalışılmasında kullanıldığında genellikle sonsuz seyrelme bölgesinde çalışılır. Böylece prob-prob etkileşimleri ihmal edilebilir çünkü prob tarafından katı yüzeyin kaplanması çok düşük düzeydedir. Sadece katı-prob etkileşimi hesaba katılır.

Ters gaz kromatografisindeki en temel değer net alıkonma hacmidir. Sonsuz seyrelmede net alıkonma hacmi, enjekte edilen prob buharının kolondan çıkması için gereken taşıyıcı gaz miktarıdır. Bir katının yüzey serbest enerjisinin, dağılım bileşeni ve spesifik bileşeni olmak üzere iki bileşeni vardır. Bir başka deyişle, katının yüzey serbest enerjisi apolar dağılım bileşeni ile polar spesifik bileşenin toplamıdır. Dağılım bileşeni, nispeten zayıf olan van der Waals dağılım kuvvetlerine (London kuvvetleri, Debye kuvvetleri ve Keesom kuvvetleri) dayanır. Spesifik bileşen ise polar kuvvetlerin (dipol kuvvetler ve asit-baz kuvvetleri) tümünü içerir.

Alıkonma zamanını belirleyebilmek için bir homolog alkan serisi buharı çok küçük derişimlerde (sonsuz seyrelme) ve izotermal koşullarda sırayla kolona gönderilir. Her bir alkan için elde edilen alıkonma zamanı verisinden çalışılan kolon sıcaklığı için tek bir sayısal yüzey serbest enerjisinin dağılım bileşeni (γ_s^d) değeri hesaplanır. TGK literatüründe, γ_s^d değeri genellikle aşağıdaki gibi belirlenir:

$$RT \ln V_N = 2N \cdot (\gamma_s^d)^{1/2} \cdot a \cdot (\gamma_L^d)^{1/2} + C \quad 1)$$

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Burada, R, ideal gaz sabiti, T, mutlak kolon sıcaklığı (K), a adsorplanan alkan türünün kapladığı moleküler yüzey alanı, N Avogadro sayısı, γ_L^d sıvı alkanın (prob) yüzey dağılım serbest enerjisi, VN karbon sayısı n olan n-alkan probunun net alıkonma hacmi ve C ise referans hale bağlı bir sabittir. Sıvı n-alkan serisi için $RT \ln V_N$ 'e karşı $a.(\gamma_L^D)^{1/2}$ değerleri çizilirse bir doğru elde edilebilir. Böylece katı sabit fazın dağılım serbest enerjisi doğrunun eğiminden hesaplanabilir. Hesaplamalar için gereken $a.(\gamma_L^D)^{1/2}$ değerleri literatürden bulunabilir. Net alıkonma hacmi (VN) ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$V_N = F_o \frac{T}{T_o} \frac{3}{2} \left[\frac{(P_i/P_o)^2 - 1}{(P_i/P_o)^3 - 1} \right] (t_A - t_o) \quad (2)$$

Burada, tA probun kolondaki kalış süresi, to ise kolondaki katı ile etkileşimi olmayan maddenin (marker) kalış süresidir. Pi ve PO, sırasıyla kolon giriş ve çıkış basınçlarıdır, T/To oranı ise akış hızı oda sıcaklığında (To) ölçüldüğünden, kolon sıcaklığındaki (T) akış hızı değerine geçmek için kullanılır. Taşıyıcı gazın kolon çıkışında ve oda sıcaklığında ölçülen akış hızı ise Fo ile ifade edilmiştir. Aşağıdaki eşitliğe göre, adsorpsiyon entalpisinin spesifik bileşeni (ΔH^{sp}) ve adsorpsiyon entropisinin spesifik bileşeni (ΔS^{sp}), ΔG^{sp} 'nin sıcaklıkla ilişkisinden belirlenebilir:

$$\frac{\Delta G^{sp}}{T} = \frac{\Delta H^{sp}}{T} - \Delta S^{sp} \quad (3)$$

$\Delta G^{sp}/T$ değerlerine karşı $1/T$ değerlerinin grafiğe geçirilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi spesifik entalpiyi, ΔH^{sp} ; kesim noktası spesifik entropiyi, ΔS^{sp} verir. Elde edilen ΔH^{sp} değerlerinden asitlik- bazlık parametreleri hesaplanır. Eşitlik 4 kullanılarak asitlik; K_A ve bazlık; K_D sabitleri belirlenir.

$$-\frac{\Delta H^{sp}}{AN^*} = K_A \frac{DN}{AN^*} + K_D \quad (4)$$

Burada K_A ve K_D parametreleri incelenen yüzeyin elektron alabilme (acceptor) ve verebilme (donor) kabiliyetini tanımlar. AN^* , adsorplanan test maddesinin alıcı sayısını (acceptor number) ve DN ise verici sayısını (donor number) gösterir. Asidik, bazik ve amfoterik özelliklere sahip dikkatlice seçilmiş test bileşikleri yardımıyla K_A ve K_D değerleri hesaplanabilir. Yukarıdaki eşitliğe göre ($\Delta H^{sp}/AN^*$) ve (DN/AN^*), değerlerinin grafiğe geçirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimi K_A 'yı, kesim noktası K_D 'yi verir. Son olarak katı yüzeyin doğasının genel ama kullanışlı bir tanımlaması, KD/KA olarak bilinen SC parametresinin belirlenmesiyle elde edilebilir. Bu parametreden elde edilen değerlere göre $SC \leq 0.9$ ise yüzey asidik, $SC \geq 1.1$ ise yüzey bazik, eğer 0.9 ile 1.1 arasında ise yüzey amfoterik olarak kabul edilmektedir (Bilgiç, 2018:319)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Zeolitler doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılır. Zeolitlerin karakterizasyonu gerek sentetik zeolitlerin ne kadar başarılı olarak sentezlendiğinin belirlenmesinde gerekse de zeolitlerin yapısını, çeşidini ve diğer özelliklerini belirlemek için önemlidir. Zeolitlerde belli bir işleme başlanılmadan önce uygun özellikte olup olmadıklarına bakılır. Eğer değilse ise başka bir sentez metodu kullanılarak veya zeolit modifikasyona tabi tutularak uygun hale getirilir. Hangi özelliğin hangi uygulamada, hangi zeolit için ne kadar önem taşıdığı değişmektedir. Örneğin Zeolit A için gözenek büyüklüğü, kimyasal bileşimi ve morfolojik madde büyüklüğü, iyon değişimi için önemli iken kararlılık ve asitlik özellikleri bu özelliklerinin yanında önemsiz kalmaktadır. Zeolit Y için

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

kimyasal yapı, asitlik, kararlılık özellikleri önemlidir. Bunun yanı sıra gözenek büyüklüğü ve parçacık büyüklüğü daha az önemli özelliklerdir. Bu nedenlerden dolayı hangi işlem için hangi zeolitin kullanılacağı büyük önem taşımaktadır.

Daha yüksek saflıkta ve düzgün parçacık boyutlarına sahip ticari sentetik zeolitler, doğal zeolitlerden daha sık kullanılır. Bu nedenle, çoğu mühendislik uygulaması ve bilimsel amaç için daha uygundur. Zeolit sentezi, sürdürülebilir koşullar altında temel çalışmalar için hala verimli bir zemin olduğundan, her zaman ilgi çekmektedir. Doğal zeolitlerin küçük gözenek boyut dağılımları ile katalitik reaksiyonlar için uygun olmamaları sentetik zeolit kullanımını gündeme getirmiştir. Zeolitlerin hidrokarbon dönüşümleri içerisinde ilk kullanımı parçalama prosesinde ham materyalden sıvı fuel-oil üretiminde katalizör olarak zeolit X'in kullanımı ile başlar. Hidrokarbon molekülleri ile zeolit katalizörler arasındaki çok yüksek hidrojen iyonu dağılımı yüksek değerli moleküller arası hidrojen transferi hızı gibi özellikler parçalama reaksiyonlarında zeolitlerin kullanım yaygınlığını arttıran faktörlerdir.

3.1. XRF Analizleri

XRF analizi, zeolit X'in silisyum ve alüminyum bileşimini verir. Tablo 1, zeolit X'in kimyasal bileşimini listeler.

Tablo 1. Ağırlıkça % olarak sentezlenen Zeolit X kimyasal bileşimi

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	CuO	Fe ₂ O ₃	CaO	NiO	Cl	ZnO
ZeoX	45.53	33.30	20.75	0.04	0.02	0.12	0.113	0.08	0.12	0.02

3.2. X Işını Difraksiyonu

X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılan bu yöntem X-ışını kırınım analizi adı verilir. Kristale zarar vermeden yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. XRD, kristal fazlarının atomik dizilimlerine bağlı olarak x-ışınlarını belirli şekillerde kırması esasına dayanır. 1912 yılında Laue tarafından literatüre kazandırılan bu karakteristik kırınım olayı ile maddelerin nitel ve nicel analizleri son derece yüksek hassasiyetlerde yapılabilmektedir. XRD analizleri katalizör karakterizasyonunda en eski ve en sık kullanılan tekniklerinden biridir. X- ışınları katı içine çok iyi nüfuz edebildiğinden içyapıyı ölçmek için ve kristal yapıların incelenmesinde önemli bir yer tutar. XRD, yığın faz yapısını belirlemek, yığın fazdaki dönüşüm kinetiğini incelemek ve parçacık boyutunu belirlemek için kullanılmaktadır.

Zeolit X için $2\theta = 5-80^\circ$ aralığındaki XRD deseni Şekil 1'de verilmiştir. $2\theta = 13.86^\circ$ 'daki güçlü kırınım piki sentezlenen zeolitin alüminyum oksit (Al₂O₃) içerdiğini göstermektedir. XRD şablonu, Zeolit X'in karakteristik piklerine karşılık gelen 6.12° , 13.86° , 23.13° , 24.81° , 26.96° and 30.79° 'ya eşit 2θ değerlerinde yoğun kırınım zirveleri sunar (Balkus ve Ly, 1991:875; Hashemi ve diğ., 2016: 286). Bu, zeolit X'in (JCPDS No. 01-089-8235) standart spektrumları ile uyumludur ve sentezlenen zeolitin Si/Al oranı 1,3 eşit olduğundan düşük silikalı X zeolitinin başarıyla üretildiğini doğrulamaktadır (Hui ve diğ., 2014:65).

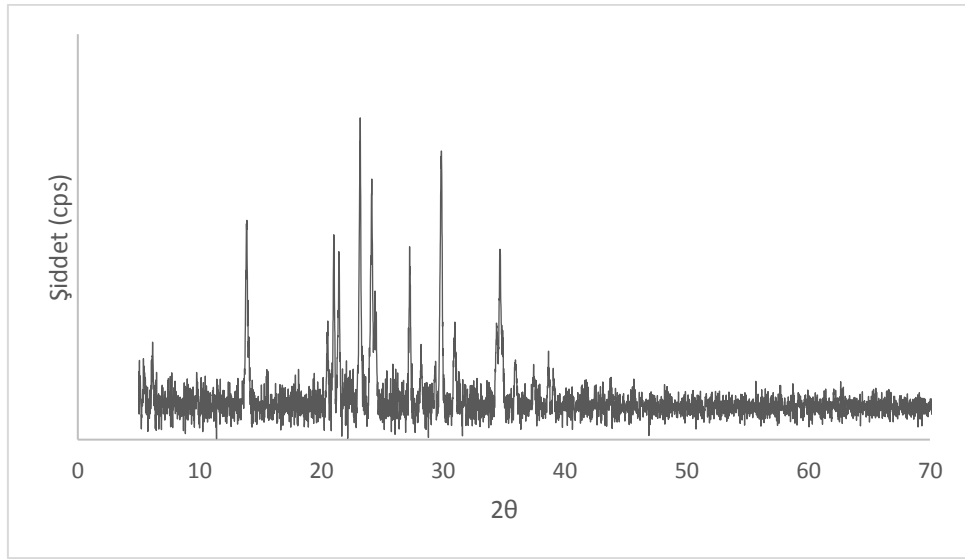
Sentezlenen numunelerin kristalit boyutu (D, nm), Scherrer denklemi (Denklem 5) kullanılarak hesaplandı:

$$D = 0.9 * \frac{\lambda}{\beta} * \cos \theta_B \quad 5)$$

$$D = 0.9 * 1.5406 / 0.0018 * \cos(11.5966) = 889.37 \text{ \AA}$$

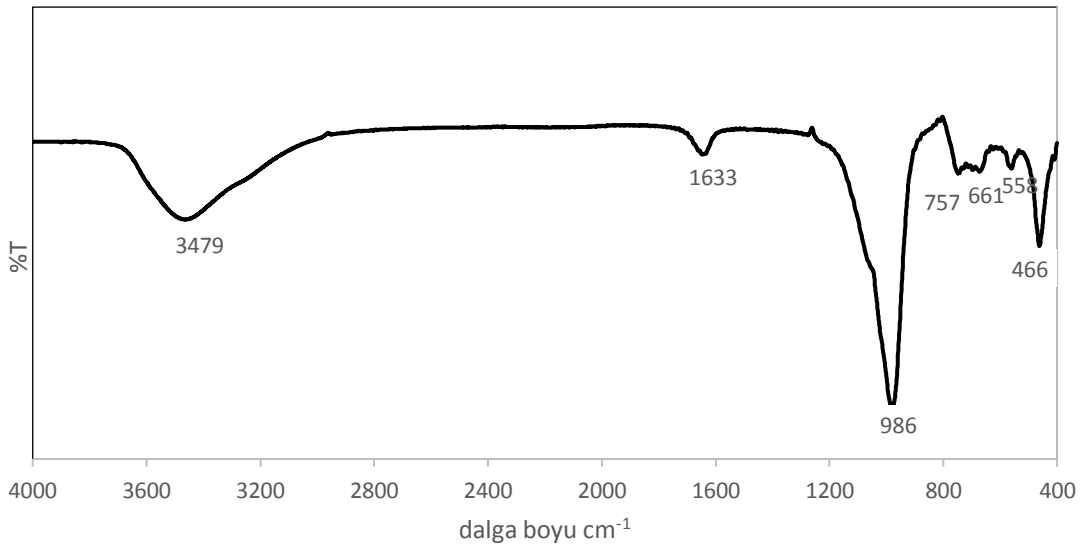
burada β , θ_B , ve λ , sırasıyla XRD kırınım piklerinin maksimumunun yarısındaki tam genişliktir (FWHM), Bragg formülüne göre kırınım açısı ve X ışını radyasyonunun dalga boyudur (Nassar ve diğ., 2017: 302; Nassar ve Abdelrahman, 2017: 364; Novembre ve diğ., 2013:339).

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ



Şekil 1. Sentezlenen zeolit X'in XRD deseni

3.3. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi



Şekil 2. Sentezlenen zeolit X'in FTIR spektrumu.

FTIR, çeşitli maddelerin yapısı ve farklı işlemlerden sonra oluşan kimyasal değişimler hakkında hızlı bilgi veren bir yöntem olduğundan oldukça kullanışlıdır (Pandey, 1999:1969). Çeşitli bağların titreşim frekanslarını ölçerek moleküldeki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi verir. Kızılötesi (IR) absorpsiyon spektroskopisi bir tür titreşim spektroskopisidir. Her dalga boyunu ayrı ayrı tarama gereksizdir hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir.

Zeolitlerde alüminosilikat kafes yapısının varlığı FTIR spektroskopik tekniği kullanılarak doğrulanır. Şekil 2, sentez ürünü zeolit X'in IR spektrumlarını göstermektedir.(422- 525 cm^{-1} aralığındaki tetrahedral düzlem içi bükülme piki, alüminanın zeolit tetrahedral kafesine katıldığı göstermektedir. 1633 cm^{-1} deki karakteristik IR titreşim bandı Si/Al- O'nun asimetrik gerilmesini temsil eder. 1300 ve 850 cm^{-1} arasındaki pikler tetrahedral bölgedeki iç bağların asimetrik olarak gerilmesine ve 1044 cm^{-1} de gözlenmesi gereken fakat 986 cm^{-1} 'e kayan ana bant tetrahedral bölgedeki dış bağların asimetrik olarak gerilmesine aittir (Novembre ve diğ., 2013:339). Ayrıca, 466

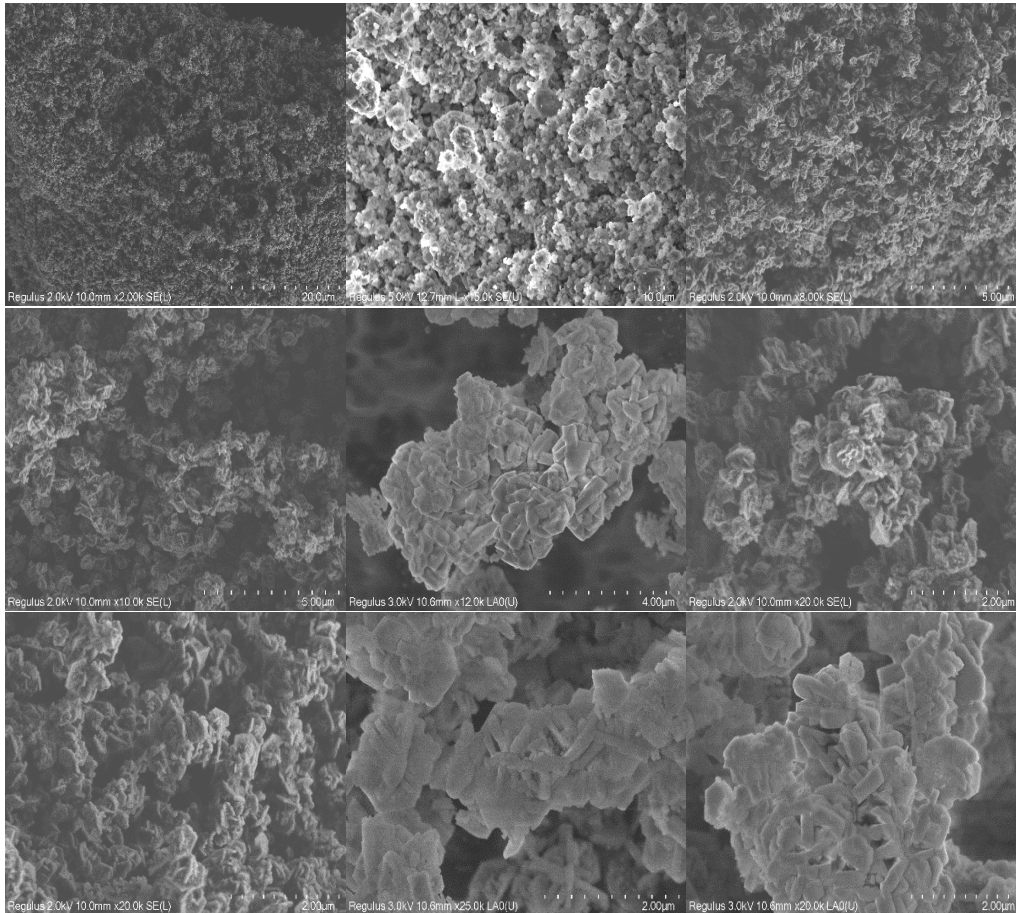
HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

cm^{-1} ' deki bant ürünlerdeki T-O bağının tipik bandıdır (burada T = Si veya Al). 558 cm^{-1} 'deki bant sodalit kafeslerini bağlayan çift altılı halkalara (D6R) aittir ve 661 cm^{-1} deki bant simetrik gerilmedendir (Ma ve diğ., 2014:495).

3.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

SEM yüzey analiz, elementel analiz ve kimyasal karakterizasyon süreçlerinde yaygın olarak kullanılan tekniklerden birisidir. Yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilen yöntem ile yüzeye dair detaylı bilgiler elde edilebilmektedir. Öte yandan çapı nanometre seviyelerinde olan alanlarda dahi elementel analizler yapılmasına imkân sağlar. SEM incelemeleri için örneğin yüzeyi elektrik iletkenliği özelliğine sahip olmak zorundadır. Bu nedenle iletken olmayan katılar elektriksel iletken tabaka ile (vakumla altın kaplanması) kaplanmaktadır. SEM'de görüntülerin büyütülmesi taranan alanların küçültülmesi ile sağlanır.

Kristalin fazın taramalı elektron mikroskopisi (SEM) görüntüleri, ortaya çıkan kristallerin morfolojisini ve büyüklüğünü tanımlayabilen kullanışlı bir tekniktir. SEM mikrografı ayrıca XRD analizinin sonucunu da destekler. Hidrotermal muamele ile sentezlenen zeolit X'in SEM mikrografı, farklı büyütme ölçekleri kullanılarak Şekil 3'te sunulmaktadır. SEM mikrografları çubuk benzeri düşük silika X zeolit kristalinin oluşumunu gösterdi. Silika ve alüminanın üst üste kaydığını gösteren mikrograftan, çubuk benzeri bir yapı gözlemlendi. Sentezlenen numunede çubuk benzeri yapının bir miktar kısmı hasara uğradığı gözlemlenmiştir (Ciardelli ve Ranieri, 2001:567). Zeolit X'in SEM mikrografları, birbirine geçmiş disk benzeri yapıları içeren benzersiz hiyerarşik morfolojinin elde edildiğini gösterdiğinde Musyoca tarafından bildirilmiştir (Musyoca, 2012; Musyoca ve diğ., 2014:537).

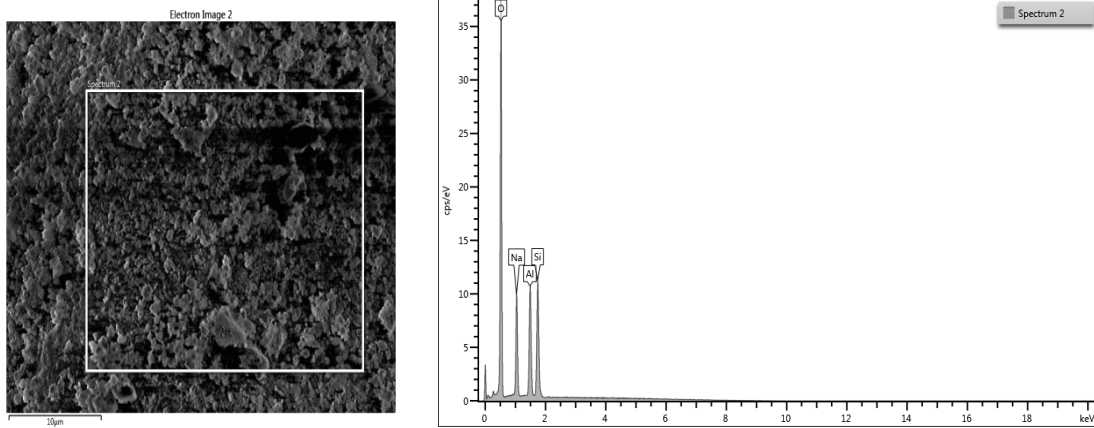


Şekil 3. Sentezlenen zeolit X SEM mikrofotografı. Ölçek aralığı = 20 µm, 10 µm, 5 µm, 4 µm, 2 µm

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

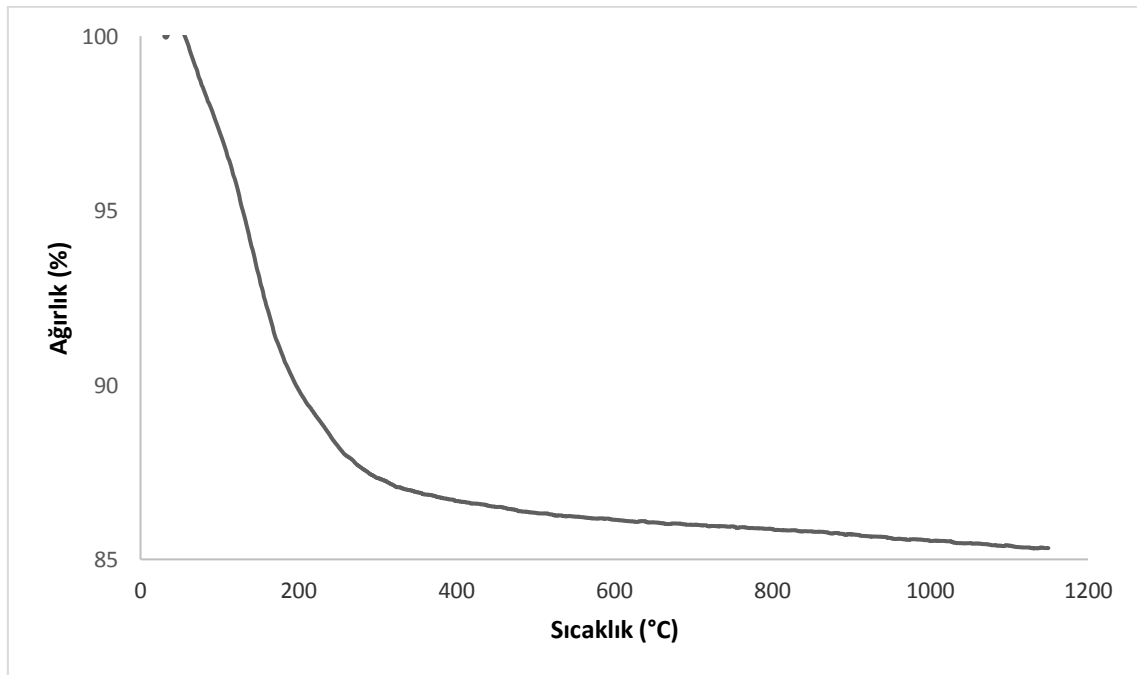
3.5. Morfolojik Analiz (FESEM)

Şekil 4, 90 °C'de 16 saat süreyle hidrotermal olarak elde edilen zeolit X'in morfolojik analizinin FESEM görüntüsünü gösterir. Çubuk şeklindeki zeolit X'in morfolojisinin ortaya çıktığını göstermektedir. Şekil, sentezlenen zeolitte O, Na, Al ve Si'nin varlığını teyit eder. EDX tarafından incelenen zeolit X'in temel analizinden, Si/Al oranını 1,3 olarak bulunmuştur. Sentezlenen zeolit X'in FESEM görüntüleri, zeolit X'in tipik oktahedral kristallerini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4. FESEM image of and (EDX) of zeolite X synthesized at 90°C for 16 hours

3.6. TGA Analizi

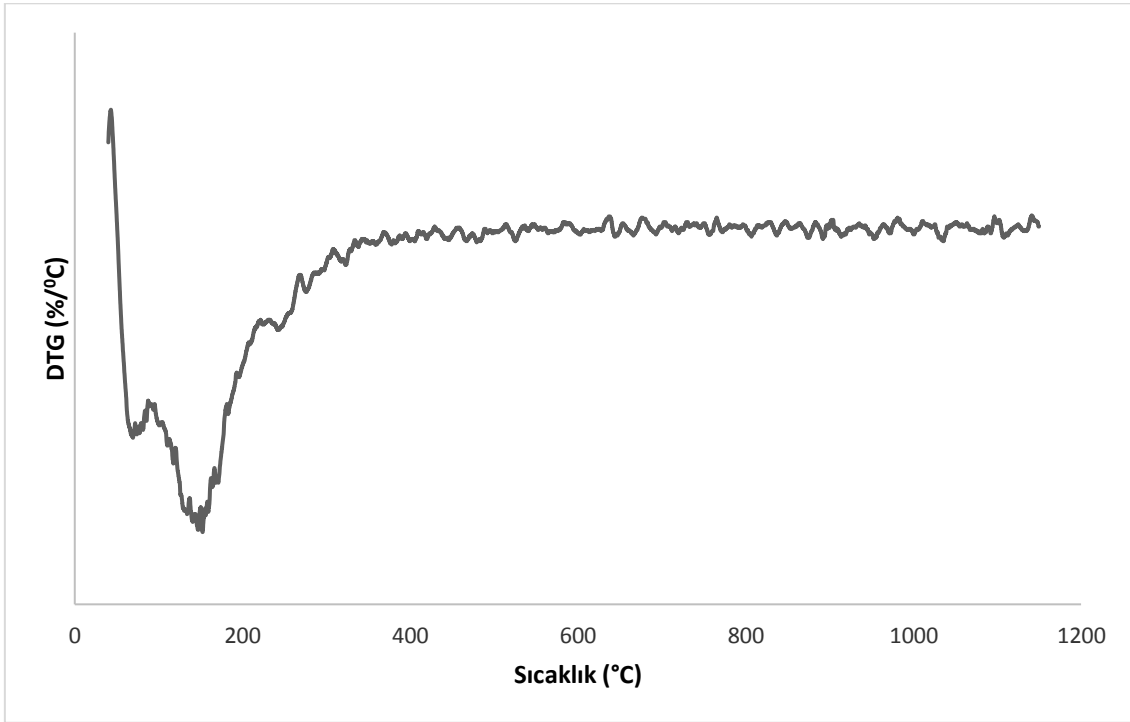


Şekil 5. Sentezlenen zeolit X'in TGA grafiği.

Termogravimetrik analiz, termal analiz tekniklerinden biridir ve kütle değişimleriyle malzemenin termal stabilitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, bu analiz; yapı bileşenlerinin belirlenmesinde, termal ve oksidatif stabilizasyon çalışmalarında ve tahmini kullanım süresini belirlemek için reaksiyon kinetiklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. TGA; kontrollü bir ortamda, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyon olduğu deney süresince, malzemede meydana gelen

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

kütle kayıplarının ölçülmesidir. Bu değerler, materyalin bileşenleri yanında, materyallerin termal stabilizasyonu hakkında çeşitli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 6. Sentezlenen zeolit X'in DTG eğrisi

Şekil 5 ve 6, sentezlenen zeolitinin 1100°C'ye kütle kaybı yoluyla termal stabilitesinin belirlendiği TGA ve DTG eğrilerini göstermektedir. TG sonuçları, sentezlenen zeolit X'in 350 °C'nin altındaki sıcaklıklarda tüm nemini (ağırlıkça% 16) kaybettiğini göstermiştir. 70-85 °C arasındaki başlangıçtaki kütle kaybı, topaklanma olmuş ve adsorplanmış suyun giderilmesinden kaynaklanmıştır. 850 °C'de kısmi ağırlık kaybı ile birlikte önemli bozunma 150 °C'de gözlenmiştir. Kristalin zeolit kafesinin tamamen yok olduğunu gösteren sıcaklık artışı ile başka bir kütle kaybı gözlenmemiştir (Adamczyk ve Bialecka, 2005:713). Ek olarak, DTA eğrileri, zeolit X numunesindeki endotermik piklerin düşük sıcaklıklarda (150 °C) meydana geldiğini gösterdi. Bununla birlikte, 850 °C sıcaklıktaki ekzotermik zirveler, nefelinden NaAlSiO₄ kaynaklanan kafes çökmesine ve kristalleşmesine bağlanabilir. TG-DTA analizi, sentezlenen X zeolitinin mükemmel termal stabiliteye sahip olduğunu göstermiştir.

3.7. TGK ve Hammett İndikatörleri Kullanılarak Amin Titrasyonu ile Asit Miktarı Tayini

Ters gaz kromatografisi, toz haldeki katının yüzey özelliklerinin incelenmesinde kullanılan etkili bir tekniktir. Termodinamik bir yöntem olarak nitelenen ters gaz kromatografisi yöntemiyle sonsuz seyrelme bölgesinde, kolon içerisindeki sabit faz ile polar moleküller arasındaki etkileşimlerden yararlanarak birçok termodinamik özelliklerle beraber yüzey asitlik ve bazlık parametreleri de belirlenebilir. TGK'nın en ilginç ve yaygın kullanılan uygulamalarından biri, yüzey enerjisinin ölçülmesidir. TGK ölçümlerinin prensipleri ile ilgili olarak, bu metottan elde edilen temel veriler, alıkonma süresi veya alıkonma hacmidir. Alıkonma verileri, prop molekülü ile sabit faz arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak bir tepe oluşturmak için sırasıyla gerekli zaman ve taşıyıcı gaz hacmini belirtir. Bir malzemenin çeşitli özellikleri bu etkileşimlerin niteliği ve büyüklüğü analiz edilerek hesaplanabilir. Katıların yüzeyleri, dağıtıcı ve spesifik (dağıtıcı olmayan) özellikler ile tanımlanmaktadır. Dağıtıcı ve spesifik bileşenlerin toplamı, toplam katı yüzey enerjisini temsil eder. Geçmişte, bir katının yüzey enerjisi, yüzey enerjilerinin dağılım bileşeninin ve spesifik bileşeninin

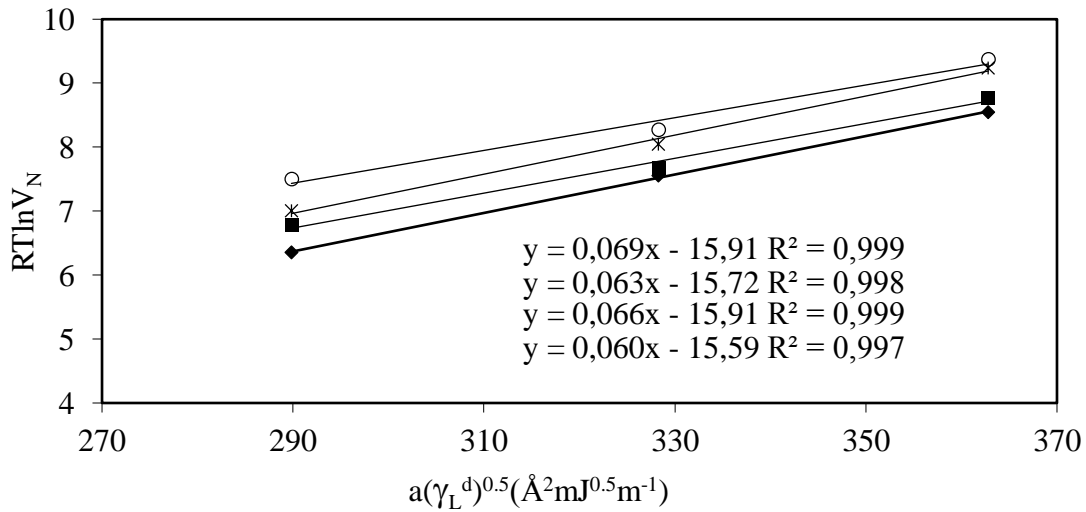
HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

toplamı ile tanımlanmıştı. Daha sonra, asit-baz (alıcı-verici) katkılarının, dağılım bileşenini hesaplamak için daha hızlı bir terim olduğu bulunmuştur (Charmas vd., 2000).

Katıların yüzey serbest enerjileri, endüstrideki çeşitli uygulama ve süreçler için anahtar rol oynamaktadır. Örneğin, kompozitlerde ve kaplamalarda bileşenlerin birbiriyle uyumluluğunda ve yapışmasında katıların yüzey serbest enerjileri önemli bir etkidir. Katalizör ve adsorbanların yüzey etkileşimleri onların katalitik ve adsorpsiyon özelliklerini etkiler. Yüzey enerjisi, tanecik aglomerasyonu, ıslanabilirlik ve taneciklerin yapışıcılarla etkileşimi gibi olayları aynı zamanda taneciklerin sıvılardaki dağılım davranışını etkilemesi açısından oldukça önemlidir. Katıların yüzey enerjilerinin karakterizasyonu, onların yüzey özelliklerinin geliştirilebilmesi bilhassa yüzey modifikasyonu yapılabilmesi için önemli bilgilere ulaşılmasını sağlar. Ayrıca yüzey biliminin temellerinin anlaşılmasına yardımcı olur (Ylä-Mäihäniemi ve diğ., 2008:9551).

Adsorpsiyon çalışmaları sonsuz seyreltme koşullarında gerçekleştirildi. n-alkanların zeolit X üzerindeki kromatografik pikleri simetrikler. Bu nedenle alıkonma süresi enjekte edilen miktardan bağımsızdır. Değeri, yüzeyin n-alkanlarla etkileşimini temsil eder ve bu nedenle yüzeyin probu ne kadar kolay polarize edebileceğinin bir ölçüsüdür. Yüzey serbest enerjisinin dağılım bileşeni, 8 ile 10 karbon atomuna sahip homolog bir n-alkan serisinin enjeksiyonu ile belirlenmiştir. Bir katının yüzeyindeki enerji durumunun tanımlanması için en yaygın ölçülen parametrelerden biri yüzey enerjisidir. Yüzey enerjisi katalitik aktiviteyi veya parçacık-parçacık etkileşiminin gücünü belirler.

Şekil 7'de verildiği gibi, zeolit X için $RT \ln V_N$ değerine karşı $a(\gamma_L^d)^{1/2}$ değerlerinin grafiğinin eğimleri düz bir çizgi oluşturmuştur. Zeolit X için γ_s^d değerleri 150°C'de 6,44 mJ/m², 160°C'de 6,24 mJ/m², 170°C'de 5,2 mJ/m² ve 180°C'de 4,51 mJ/m² arasında değişmektedir. Sıcaklık arttıkça değerlerin düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 7. Sentezlenen zeolite X için $RT \ln(V_N) - a(\gamma_L^d)^{1/2}$ grafiği.

Lewis asit-baz yüzey etkileşimlerine kapsamlı bir bakış, zeolit X'in katalitik ve emme kapasitelerinin etkisinin yanı sıra, uygulamaları içinde büyük önem taşıyan kimyasal modifikasyonlarla değişme yeteneklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Schultz'un yönteminin deneysel sonuçlarımıza uygulanmasıyla ΔG^{sp} , ΔH^{sp} ve ΔS^{sp} değeri hesaplandı. Farklı sıcaklıklardaki zeolit X ve polar problemlerin serbest enerjisindeki ΔG^{sp} değişim Tablo 2'de verilmiştir. Zeolit X üzerindeki polar problemlerin ortalama ΔG^{sp} değerleri aşağıdaki sırayla verilmiştir: TCM < Et.

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ac. < DEE < Aseton. $-\Delta H^{sp} / AN^*$ ve DN / AN^* değerlerine karşı bir grafik çizildiğinde, eğim K_A ve kesim noktası K_D olur. Katıların asit-baz karakterleri K_D/K_A oranından değerlendirilebilir; yani yüzey $K_D/K_A > 1$ için bazik, yüzey $K_D/K_A < 1$ için asidik olarak kabul edilir. Zeolit X için K_A ve K_D değerleri 0,130 ve 2,074 olarak bulunmuştur. K_A ve K_D için elde edilen değerlere göre yüzey, $K_D / K_A = 0.047$ oranında asidik karakter sergiler.

Tablo 2. Sıcaklıkla değişen ΔG^{sp} değerleri, ve Polar propların Zeolit X üzerindeki ΔH^{sp} and ΔS^{sp} değerleri

		$-\Delta G^{sp}$ (kJ mol ⁻¹)					$-\Delta H^{sp}$	$-\Delta S^{sp} 10^3$
Adsorbent Polar maddeler		150 °C	160 °C	170 °C	180 °C		(kJ mol ⁻¹)	(kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
Zeolit X	TCM	0.33	1.49	1.52	2.24		24	-58
	DEE	10.77	11.35	10.0	10.4		-21	24
	Aseton	16.7	16.81	15.72	15.6		-35	43.6
	Etil Asetat	1.21	2.17	2.16	2.54		15.5	-40

Amin titrasyon yöntemi indikatörleri kullanarak, yüzeye adsorbe edilen uygun indikatörlerin rengini gözlemleyerek yapılar ve asit kuvvetinin bir ölçüsünü verir. Renk, indikatörünün asit formuyla aynıysa, katının H_0 fonksiyonunun değerleri, indikatörün konjugat asidinin pKa'sına eşit veya daha düşüktür. Renk testleri, kurutulmuş, toz haline getirilmiş katı maddenin bir şişeye aktarılması ve üzerine indikatör çözeltisi ilave edilerek gerçekleştirildi. Bu tür verilerin sonuçlarından, incelenen katının H_0 değerine sahip olanın tüm indikatörler için veya iki bitişik indikatör pKa arasında bazik veya asidik olduğuna karar vermek kolaydır. Bu çalışmada asit kuvvetini belirlemek için $H_0 \leq +7.2$ ile $H_0 \leq 28.2$ indikatörleri kullanılmıştır. Hammett indikatörlerinin adsorbe formunun rengini gözlemleyerek, numunenin H_0 sınırları belirlenmiştir. Zeolit X'in asit kuvvetleri +4.8 ile +6.8 arasında değişmektedir. Yani Zeolit X'in toplam asit miktarının 0.6 mmol g⁻¹ olduğu, bu da 0.3 ($H_0 \leq 6.8$) ve 0.3 ($H_0 \leq 4.8$) kuvvetli asit bölgelerinin toplanması anlamına gelir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, saf bir zeolit X, optimum kristalleştirme koşulları altında basit bir sentez işlemi olan hidrotermal sentez yoluyla sentezlenmiştir; kristalizasyon sıcaklığı 90°C ve reaksiyon süresi 16 saattir. Zeolit X, çubuk benzeri şeklindeki kristal yapısı ve Si/Al = 1,3 ile yüksek bir kristallikte sentezlenmiştir. Zeolit düzenli ve düzgün bir morfolojik yapıya sahiptir. Kristallerin XRD'si düşük güçlü, keskin yansımalarla sahiptir, bu da sentezlenen zeolit X'in iyi kristalize olduğunu gösterir. Zeolit X'in termal stabilitesi, termal gravimetrik analiz kullanılarak başarıyla araştırılmıştır. Zeolit TGA analizinden, kristal yapının yüksek sıcaklıklara kadar kararlı olduğu ve yaklaşık 800 °C'ye kadar yapısal değişikliklerin olmadığı ortaya çıktı. Bu durum ısı işlemin gerekli olduğu rejenerasyon süreçleri sırasında veya yüksek sıcaklıklar gerektiren süreçlerde, ısıtma ve su kaybı üzerine yapısal bütünlüğünü diğer özelliklerle birlikte koruyabilme yeteneği, bu zeolitleri faydalı kılar.

Katı yüzey asit-baz özelliği, kullanım alanlarına göre katıların aktivitesini ve seçiciliğini kısıtlayabilir. Yüzey asit-baz özelliklerini saptamak için çalışılacak yöntem seçiminde; güvenilir sonuçların alınması ve mevcut yöntemler içerisinde yaygın olarak kullanılmaları oldukça önemlidir. Her bir yöntemden elde edilen bulguların birbirini bütünleyen nitelikleri tercih nedenini oluşturmuştur. Eski yöntemlerden biri olan indikatör boya adsorpsiyonunun Bronsted asit-baz özelliklerini, diğer metotlara göre yeni sayılabilecek bir metot olan TGK'nin de Lewis asit-baz özelliklerini saptamada kullanıldığı bilinmektedir.

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, zeolit X yüzeyinin karakteristiği iki farklı yöntemle asidik olarak belirlenmiştir. Kullanılan yöntemler TGK ve amin titrasyonu yöntemleridir. TGK toz halindeki katı bir maddenin yüzey özelliklerinin incelenmesinde kullanılabilen güçlü bir tekniktir. Kolon içerisine yerleştirilen sabit fazın incelendiği TGK, geleneksel gaz kromatografisinin bir benzeri olmakla birlikte tersidir. TGK, bazı polar olmayan ve polar adsorbanların adsorpsiyonu ile Lewis asit-baz parametrelerini belirlemek için oldukça hassas bir yöntemdir. K_D/K_A oranı 0.047 (<1) olduğundan, zeolit X'in yüzeyi asidiktir. Bu aynı zamanda, katı yüzeyin toplam asit miktarı hakkında başka bir değerli bilgi sağlayan amin titrasyon yöntemi ile de doğrulanmıştır. Asit alanların toplamı, zeolit X'in toplam asit miktarına eşit olan 0.6 mmol g^{-1} 'dir.

Burada kullanılan hidrotermal işlem, geleneksel sentez tekniklerine kıyasla basit, düşük maliyetli ve çevre dostudur. Ayrıca, çeşitli çalışmalar, zeolitlerin morfolojisinin ve kristalliğinin belirlenmesi zeolitlerin adsorpsiyon, ayırma ve iyon değişim süreçleri sırasında kullanılması durumunda etkinliğini belirleyen önemli özelliklerdir. Bu nedenle, hem endüstriyel uygulamalar hem de temel çalışmalar için sentetik zeolit sentezindeki parametreleri kontrol etmek önemlidir. Genel olarak, yeşil kimya gereklilikleri göz önüne alındığında, zeolitler petrokimyasal reaksiyonlar için katalizör, birçok çevresel kirleticinin uzaklaştırılması için adsorban ve deterjan endüstrisinde kullanım için umut verici malzemelerdir.

Bu çalışmada sentezlenen zeolit X adsorban, destek katısı, iyon değiştirici gibi çeşitli amaçlarla ve en önemlisi de katalizör olarak kullanımı, bu alandaki ihtiyaçları araştırmaya yönlendirmiştir. Kullanım alanları incelendiğinde ise, bu katıların yüzey özelliklerinin araştırılma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Literatürde konuyla ilgili yapılmış ve yapılmakta olan pek çok çalışmanın olması, konunun önemini ayrıca vurgulamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen bir projenin (2018-2029) bir parçasıdır.

5. KAYNAKÇA

Abdelrahman, E. A. (2018). Synthesis of zeolite nanostructures from waste aluminum cans for efficient removal of malachite green dye from aqueous media. *J. Mol. Liq.*, 253, 72–82.

Adamczyk, Z. & Bialecka, B. (2005). Hydrothermal synthesis of zeolites from polish coal fly ash. *Pol. J. Environ. Stud.*, 14, 713–719.

Balkus, K.J. & Ly, K.T. (1991). The preparation and characterization of an X-type zeolite: an experiment in solid-state chemistry. *J Chem Educ.*, 68(10), 875-877.

Bilgiç, C. (2018). Determination of the surface properties of kaolinite by inverse gas chromatography. *Water Science and Technology*, 2, 319-328.

Bugaev, L. A., van Bokhoven, J. A., Sokolenko, A. P., Latokha, Y. V. & Avakyan, L. A. (2005). Local structure of aluminum in zeolite mordenite as affected by temperature. *J. Phys. Chem. B*, 109, 10771–10778.

Chandrasekhar, S. & Pramada, P. N. (2008). Microwave assisted synthesis of zeolite A from metakaolin. *Microporous and Mesoporous Materials*, 108(1-3), 152-161.

Ciardelli, G. & Ranieri, N., The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electro flocculation. *Water Resour.*, 35, 567–572.

Corma, A. (1997). Solid acid catalysts. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2(1), 63-75.

Cundy, C. S. & Cox, P. A. (2003). The hydrothermal synthesis of zeolites: history and development from the earliest days to the present time. *Chem. Rev.*, 103, 663–702.

HİDROTHERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Cundy, C. S. & Cox, P. A. (2005). The hydrothermal synthesis of zeolites: precursors, intermediates and reaction mechanism. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 82, 1–78.

Díaz, E., Ordóñez, S., Vega, A. & Coca, J. (2005). Evaluation of adsorption properties of zeolites using inverse gas chromatography: comparison with immersion calorimetry. *Thermochim Acta*, 434, 9–14

Erbil, H. Y. (2006). *Surfaces Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd

Ferreira, L., Fonseca, A. M., Botelho, G., Almeida-Aguiar, C. & Neves, I. C. 2012. Antimicrobial activity of faujasite zeolites doped with silver. *Microporous and Mesoporous Materials*, 160, 126-132.

Gougazeh, M. & Buhl, J. C. (2014). Synthesis and characterization of zeolite A by hydrothermal transformation of natural Jordanian kaolin. *J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci.*, 15, 35–42.

Hashemi, H., Nezamzadeh-Ejhih, A. & Karimi-Shamsabadi, M. (2016). A novel cysteine sensor based on modification of carbon paste electrode by Fe(II)-exchanged zeolite X nanoparticles. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.*, 58, 286–293.

Huang, Z., Su, J. F., Guo, Y.H., Su, X. Q. & Teng, L. J. (2009). Synthesis of well-crystallized zeolite Beta at large scale and its incorporation into polysulfone matrix for gas separation. *Chem. Eng. Commun.*, 196, 969–986.

Hui, H., Gao, J., Wang, G., Liu, P. & Zhang, K. (2014). Effects of Na and K ions on the crystallization of low-silica X zeolite and its catalytic performance for alkylation of toluene with methanol. *J. Braz. Chem. Soc.*, 25(1), 65-74.

Ji, C., Zhang, L., Li, L., Xiao, F., Zhao, N., Wei, W., Chen, Y. & Wu, F. (2016). Synthesis of micromesoporous composites MCM-41/13X and their application on CO₂ adsorption: experiment and modeling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55, 7853-7859.

Kamali, M., Vaezifar, S., Kolahduzan, H., Malekpour, A. & Reza Abdi, M. (2009). Synthesis of nanozeolite A from natural clinoptilolite and aluminum sulfate: Optimization of the method. *Powder Technol.*, 189, 52–56.

Khan, G., Arafat, S., Reza, M., Razzaque, S. & Alam, M. (2010). Linde Type-A zeolite synthesis and effect of crystallization on its surface acidity. *Indian J. Chem. Technol.*, 17, 303–308.

Ma, Y., Yan, C., Alshameri, A., Qiu, X., Zhou, C. & Li, D. (2014). Synthesis and characterization of 13X zeolite from low-grade natural kaolin. *Adv. Powder Technol.*, 25, 495-499.

McCusker, L., Liebau, F. & Engelhardt, G. (2003). Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts: (IUPAC Recommendations 2001). *Microporous and Mesoporous Materials*, 58(1), 3–13.

Meng X., Wang L. & Xiao FS. (2016) Sustainable Routes for Zeolite Synthesis. In: Xiao FS., Meng X. (eds) *Zeolites in Sustainable Chemistry. Green Chemistry and Sustainable Technology*. (pp. 3-35). Berlin, Heidelberg: Springer

Mohammadi, T. (2008). Ion-exchanged zeolite X membranes: Synthesis and characterization. *Membrane Technol.*, 3, 9–11.

Musyoka, N. M. (2012). Zeolite A, X and Cancrinite from South African Coal Fly Ash: Mechanism of Crystallization, Routes to Rapid Synthesis and New Morphology. Unpublished PhD Thesis (University of the Western Cape)

Musyoka, N. M., Petrik, L.F., Hums, E., Baser, H. & Schwieger, W. (2014). In-situ ultrasonic diagnostic of zeolite X crystallization with novel (hierarchical) morphology from coal fly ash. *Ultrasonics*, 54(2), 537-543.

HİDROTHERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Nassar, M. Y., Abdelrahman, E. A., Aly, A. A. & Mohamed, T. Y. (2017). A facile synthesis of mordenite zeolite nanostructures for efficient bleaching of crude soybean oil and removal of methylene blue dye from aqueous media. *J. Mol. Liq.*, 248, 302–313.

Nassar, M. Y. & Abdelrahman, E. A. (2017). Hydrothermal tuning of the morphology and crystallite size of zeolite nanostructures for simultaneous adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue dye. *J. Mol. Liq.*, 242, 364–374.

Novembre, D., Di Sabatino, B., Gimeno, D. & Pace, C. (2011). Synthesis and characterization of Na-X, Na-A and Na-P zeolites and hydroxysodalite from metakaolinite. *Clay Miner.*, 46, 339-354.

Nozue, Y., Amako, Y., Kawano, R., Mizukane, T. & Nakano, T. (2012). Insulating state and metallic phase transition of heavily sodium-doped low-silica X (LSX) zeolites. *J. Phys. Chem. Solids*, 73, 1538–1541.

Pandey, K. K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 71, 1969–1975.

Petrik, L., Missengue, R., Fatoba, O., Tuffin, M., & Sachs, J. (2012). Silver/zeolite nano composite-based clay filters for water disinfection. Water Research Commission, WRC report (KV 297/12). Retrieved from https://pdfs.semanticscholar.org/ba06/b5ece2176611c96ad4674bb597ffaa10295d.pdf?_ga=2.266639245.2096605242.1581001383-1306827771.1581001383

Petrov, I. & Michalev, T. (2012). Synthesis of zeolite A: a review. *Scientific*, 51, 30–35.

Ribeiro, F. R., Rodrigues, A. E., Rollmann, L. D. & Naccache, C. (1984). *Zeolites: Science and Technology*. Boston, MA: Martinus Nijhoff Publishers.

Robson, H. (2001). *Verified synthesis of zeolitic materials*. Amsterdam: Gulf Professional Publishing.

Sebastian, J., Jinka, K. M. & Jasra, R. V. (2006). Effect of alkali and alkaline earth metal ions on the catalytic epoxidation of styrene with molecular oxygen using cobalt(II)-exchanged zeolite X. *Journal of Catalysis*, 244, 208-218.

Sheldon, R. A., Arends, I. & Hanefeld, U. (2007). *Green chemistry and catalysis*. Delft: John Wiley & Sons.

Strzemiescka, B., Kasperkowiak, M., Łożyński, M., Paukszta, D. & Voelkel, A. (2012). Examination of zeolites as fragrance carriers. *Microporous Mesoporous Materials*, 161, 106–114.

Sun, W., Xu, L., Chu, Y. & Shi, W. (2003). Controllable synthesis, characterization and catalytic properties of WO₃/ZrO₂ mixed oxides nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 266, 99-106

Tanebe, K. (1970). *Solid Acids and Bases, Their Catalytic Properties*. Tokyo: Kodansha Scientific Books.

Vu, X. H., Eckelt, R., Armbruster, U. & Martin, A. (2014). High-temperature synthesis of ordered mesoporous aluminosilicates from ZSM-5 nanoseeds with improved acidic properties. *Nanomaterials*, 4, 712–725.

Wajima, T. & Ikegami, Y. (2009). Synthesis of crystalline zeolite13X from waste porcelain using alkali fusion. *Ceramics International*, 35, 2983–2986.

Wang, K., Wang, X. & Li, G. (2006). Quantitatively study acid strength distribution on nanoscale ZSM-5. *Microporous Mesoporous Mater.*, 94, 325-329.

Xu, R., Pang, W., Yu, J., Huo, Q. & Chen, J. (2008). Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure. *Environ. Eng. Manage.*, 7, 73–75.

HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZLENMİŞ ZEOLİT X' İN YÜZEY ASİTLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ylä-Mäihäniemi, P. P., Heng, J. Y. Y., Thielmann, F. & Williams, D. R. (2008). Inverse gas chromatographic method for measuring the dispersive surface energy distribution for particulates. *Langmuir*, 24, 9551-9557.

Zhou, M., Rownaghi, A. A. & Hedlund, J. (2013). Synthesis of mesoporous ZSM-5 zeolite crystals by conventional hydrothermal treatment. *RSC Adv.*, 36, 15596–15599.

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Elif Özgörmüş *, Ahmet Ozan Söyleyici

* Pamukkale Üniversitesi, Pamukkale, Denizli

eo zgormus@pau.edu.tr

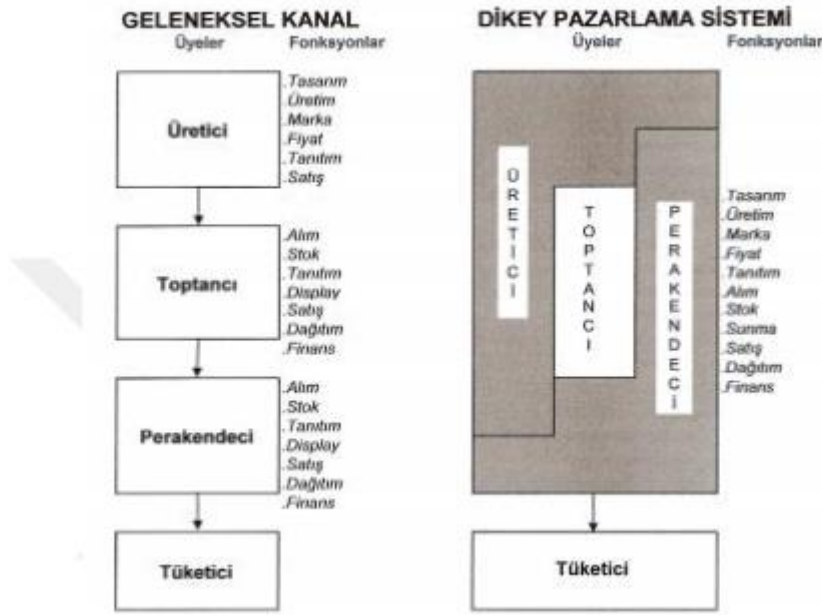
* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Günümüz rekabet dünyasında ve küreselleşmenin etkisiyle işletmeler tedarik zincirlerini en iyi şekilde yönetebilmek, süreçleri ve sistemi iyileştirebilmek adına farklı yöntemler geliştirmektedir. Tedarik zincirinin başarısında tüm üyelerin verimliliği, istenilen zamanda, istenilen miktarda, istenilen kalitede, istenilen fiyatta müşterilere ulaştırılması büyük önem taşımaktadır. Zincirin önemli halkalarından olan perakendecilik, mal ve hizmetin son tüketiciye satılması temeline dayanır ve bu sektörde ürün kalitesi, çeşitliliği ve müşteri tercihlerinin doğru belirlenmesi tedarikçi seçim probleminde dikkatle ele alınmalıdır. Bu bölümde öncelikle perakende sektöründe tedarikçi seçim problemi ele alınmış, sektöre has kriterler belirlenerek, çok kriterli karar yöntemlerinden bulanık TOPSIS yöntemi ile çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Uygulama aşamasında gerçek veriler ve sektörün içinde aktif olarak yer alan 5 yerel market yöneticisi ile Denizli ilindeki mağazalarda süt ve süt ürünleri için tedarikçi seçim problemi çözülmüştür. Sezgisel yaklaşımların ve tecrübeye dayalı kararların yoğunlukta verildiği bir sektör olan perakendecilikte analitik yöntemlerin kullanılması hem yöneticiler hem de tedarikçiler açısından olumlu sonuçlanmaktadır.

2. ÜLKEMİZDE VE DÜNYADA PERAKENDE SEKTÖRÜ

Perakende; müşterilerine satış hizmetlerinin sunulduğu finansal bir sektör türüdür ve perakendeciler malların üreticisi işletmeler ile nihai tüketiciler arasındaki bağlantıyı sağlar. Perakendecilik faaliyetinin içinde yer alan üreticiden toptancıya, distribütörden perakendeciye tüm birimler, aslında perakendecilik yapmaktadır (Kazançoğlu ve Ada, 2010). Bu anlamda tedarik zinciri yönetimi perakendecilik için ayrı bir önem taşımaktadır. Özellikle son yıllarda ortaya çıkan teknolojik gelişmeler ve internet kullanıcılarının artması, müşteri isteklerinde farklılaşmaya neden olmuştur. Günümüz akıllı telefonları ile tüm dünyadaki ürünleri ve fiyatlarını kolaylıkla takip edebilen müşteri portföyü, perakende sektöründe hızlı bir büyüme ve rekabeti beraberinde getirmektedir. Geleneksel perakendeciliğin hiyerarşik yapısı modern perakendecilikte eş zamanlı faaliyet gösteren dikey pazarlama sistemine geçmektedir. (Bakınız Şekil 1).



Şekil 1: Perakende kanal fonksiyonlarının değişimi (Alpay, 2006)

Perakende sektörü ekonominin önemli yapıtaşlarından biridir ve gerek ülkemizde gerekse dünyada hızla büyümektedir. 2018 itibarıyla 25 trilyon dolar büyüklüğe ulaşan dünya perakende sektörünün küresel e-ticaret satışlarının da etkisi ile 2021 yılına kadar yıllık ortalama yüzde 16 artması ve 4,5 trilyon dolara çıkması beklenmektedir (Sektörel Bakış 2019 Perakende). Türkiye’de 2018 sonu itibarıyla 1 trilyon TL’lik büyüklüğe ulaşan perakende sektörünün toplam GSYH’nın yaklaşık yüzde 20’sine karşılık gelmektedir. Bunun üçte ikisini geleneksel perakendenin temsil ettiği kabul edilirken, üçte birlik kısmını organize perakende sektörü oluşturmaktadır (Sektörel Bakış 2019 Perakende).

3. TEDARİKÇİ SEÇİM KRİTERLERİ VE YÖNTEMLERİ

Tedarikçi seçim kararı, işletmelerde aynı anda nitel ve nicel faktörlerin dikkate alındığı en önemli kararlardan biridir ve bu nedenle geçmişten günümüze konuyla ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Tedarikçi seçim kararıyla ilgili detaylı literatür tarama çalışmaları için bakınız: (Chai vd.,2013; Pal vd., 2013)

Tedarikçi kriterlerinin belirlenmesiyle ilgili yapılmış ilk kapsamlı çalışmalardan bir tanesi olan Dickson’ın çalışmasında (Dickson, G., 1966). 23 temel kriter tanımlanmıştır. Dickson’ın tespit ettiği en önemli üç kriter olan kalite, teslimat performansı ve maliyet hemen hemen bütün çalışmalarda yüksek önemli konumunu korumuştur. (Türer, Ayvaz, Bayraktar, Bolat, 2008). Bu üç kritere ilave olarak müşteri memnuniyeti, esneklik, satış sonrası hizmet gibi daha birçok kriter tedarikçilerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. (Akman ve Alkan, 2006).

Literatürde yer alan tedarikçi değerlendirme ve seçim süreci ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, farklı yöntemlerin uygulandığı dikkati çekmektedir. Bunlardan çok kriterli karar verme yöntemleri, ölçülebilir ve ölçülemez birçok faktörü aynı anda değerlendirme imkânı sağlayan ve karar verme sürecine çok sayıda kişiyi dahil edebilen analitik yöntemlerdir. (Özcan, Çelebi, Esnaf, 2008).

Birçok durumda kesin sayılar gerçek dünya olaylarını modellemede yetersiz kalır, çünkü insan tercih ve yargıları genelde belirsizdir ve kesin sayılarla tahmin edilemez. (Chen, 2000). BÇKKV yöntemleri, bulanık veriler içeren problemleri çözmek için önerilmiştir. Son zamanlarda bulanık küme teorilerinin uygulandığı yöntemler Topsis, Vikor, Promethee ve Electre’ dir. (Arslan ve Aydın, 2009). BTOPSIS yöntemi, dilsel belirsizliğin olduğu ve grup kararı vermeyi gerektiren problemlerin

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

çözümünde, karar verme sürecinde insan yargılarından kaynaklanan belirsizliği ortadan kaldırmak için geliştirilmiş bir ÇKKV yöntemidir. (Chen, 2000).

Tedarikçi seçim problemi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak çözülmekte olup, literatür incelendiğinde, bu çalışmaların çoğunun üretim ve imalat sektörünü kapsadığı görülmektedir (Chan ve Chan,2010; Lin vd., 2011; Büyükoçkan ve Çiftçi,2012). Perakendecilik gibi hizmet sektöründe faaliyet gösteren firmaların tedarikçi seçim probleminin çözümünde az sayıda çalışma mevcuttur. Oysa sektöre has özellikler dikkate alınmadan verilecek bir karar, zaman içerisinde geri dönülmesi zor sonuçlar doğurabilmektedir.

Ülkemizde perakende sektöründeki tedarikçi seçim problemini inceleyen Kazançoğlu ve Ada (2010), kalite, performans ve finansal üç ana kriter, on bir alt kriteri belirleyerek bulanık AHP tekniği ile çözüm sunmuşlardır. Lin ve Wu (2011); süpermarketlerde tedarikçi seçimini bulanık Delphi tekniği ile gerçekleştirmiş, uygulamada Tayvan'daki bir süpermarket zincirinin meyve sebze reyonunun tedarikçilerini incelemiştir. Perakende sektöründeki son çalışmalardan birisi de Rezaei vd.(2014) tarafından havayolları şirketleri için yapılmıştır. Bu çalışmada bulanık AHP yöntemi kullanılarak KLM hava şirketinin tedarikçileri belirlenmiştir.

Üretim sektöründe tedarikçi değerlendirme aşamasında kullanılan kriterler kalite, maliyet ve zaman olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır. Perakende sektöründeki tedarikçi değerlendirme kriterleri ise insan faktöründen dolayı çok daha karmaşık ve nicel yoğunluktadır. Tablo 1, Lin ve Wu'nun (2011) çalışmalardaki belirlenen ana kriterler ve alt kriterleri detaylı olarak göstermektedir.

Tablo 1: Tedarikçi seçimi için ana kriterler ve alt bölümler (Lin ve Wu,2011)

Ana Kriterler	Alt Kriterler
Tedarikçi Ölçütü	Organizasyon Yönetimi
	Pazar Deneyimi
	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma
	Finansal Durum
	İletişim
	Geçmiş Dönem İş Birliği
	Özel Marka Geliştirme
	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki
Hizmet Ölçütü	Satış temsilcisi Profesyonelliği
	İade Olacak Ürünlere Yaklaşım
	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme
Lojistik Ölçütü	Ürünlerin izlenebilirliği
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi
	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı
	Tam Zamanında Teslimat
	Gıda Taşıma Güvenliği
	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim
	Tedarik Miktar Esnekliği
Konteyner / Frigolu Araç Standardizasyonu	
Ürün Ölçütü	Marka Bilinirliği
	Ürün Kalitesi
	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması
	Ürün Çeşitliliği
	Yok Satmama Önlenmesi
	Barkod Çeşitliliği
	Satış Potansiyeli
Satış Geçmişi	
Maliyet Ölçütü	Tedarikçi Katılım Bedeli
	İskonto Oranları
	Vade ve Ödeme Seçenekleri
	Bölgesel Fiyatlandırma

3.1. METOD: Bulanık Topsis Yöntemi

Bulanık kelimesi genel olarak puslu, kesin olmayan belirsiz gibi bir dizi anlama sahiptir. (Şen,2001) Bulanık ilk olarak 1965 yılında Zadeh tarafından kullanılmıştır. Kesin küme teorisinin dilsel değişkenlerin eklenmesiyle yetersiz olduğu görülmüş ve bulanık küme teorisi önem kazanmıştır. Net olmayan ifadelerin bulanık küme teorisi ile beraber karar vermek daha başarılı sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. Az, orta, çok gibi dilsel ifadelerin kantitatif olarak neye karşılık gelebileceği tam olarak net değildir. Net olmayan bu durumu ifade edebilme kabiliyeti bulanık küme ile kolayca sağlanabilmektedir. (Seçme ve Özdemir, 2008)

BTOPSIS yönteminin temelini, seçilen alternatifin Bulanık Pozitif İdeal Çözüm'e en yakın e Bulanık Negatif İdeal Çözüm'den ise en uzak mesafede olması oluşturur. Pozitif ideal çözüm, fayda kriterlerini maksimize eden ve zarar kriterlerini minimize eden ve çözüm olarak tanımlanırken, negatif ideal çözüm zarar kriterini maksimize eden ve fayda kriterini minimize eden çözüm olarak tanımlanabilir. (Wang ve Lee, 2007)

-K adet karar verici

-Ai ile tanımlanan m adet mümkün tedarikçiler

- Ci ile tanımlanan tedarikçi performans değerlendirmesinde kullanılan n adet karar kriteri
- xij ile tanımlanan Cj kriterine göre Ai alternatiflerinin performans değerleri
- wj ile tanımlanan Cj kriterlerinin önem ağırlıkları

BTOPSIS yöntemi karar kriterlerinin farklı önem ağırlıklarına sahip olabilmelerine imkân sağlaması en belirgin özelliğidir. Karar vericiler alternatifleri değerlendirirken dilsek değişkenler kullanılabilir. Karar vericinin kriterlerin önem ağırlıkları ve kriterlere ağırlıklarını belirleyebilmektedir. Chen' in 2000 yılında geliştirmiş olduğu BTOPSIS yöntemi uygulanmıştır. (Chen, 2000)

Tablo 2: Karar kriterlerinin değerlendirilmesinde dilsel ifadeler ve üçgensel bulanık sayı karşılıkları (Chen, 2000)

Çok Düşük (ÇD)	(0.0,0.0,0.1)
Düşük (D)	(0.0,0.1,0.3)
Orta Düşük (OD)	(0.1,0.3,0.5)
Orta (O)	(0.3,0.5,0.7)
Orta Yüksek (OY)	(0.5,0.7,0.9)
Yüksek (Y)	(0.7,0.9,1.0)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.9,1.0,1.0)

Tablo 3: Alternatif değerlendirilmesinde kullanılan ifadeler ve üçgensel bulanık sayı olarak karşılıkları (Chen, 2000)

Çok Kötü (ÇK)	(0,0,1)
Kötü (K)	(0,1,3)
Orta Kötü (OK)	(1,3,5)
Orta (O)	(3,5,7)
Orta İyi (OI)	(5,7,9)
İyi (İ)	(7,9,10)
Çok İyi (Çİ)	(9,10,10)

K tane karar vericiden oluşan wjk nın K' ıncı karar vericinin değerlendirdiği karar kriterlerinin önem ağırlığını xjkk nın i. Alternatif kriter değerinin gösterdiği bir grupta, kriterin önem ağırlıkları ve alternatif kriter değerleri sırasıyla

$$\hat{w}_j = \frac{1}{K}[\hat{w}_j^1 + \hat{w}_j^2 + \dots + \hat{w}_j^K] \quad (1)$$

$$\hat{x}_j = \frac{1}{K}[\hat{x}_j^1 + \hat{x}_j^2 + \dots + \hat{x}_j^K] \quad (2)$$

Formülleri kullanarak hesaplanmaktadır.

N kriterli ve m alternatifli bir BÇKKV problemi kriter ağırlığı vektörü:

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & \dots & Cn \end{matrix} \\ \begin{matrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ \dots \\ Am \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \hat{x}_{13} & \hat{x}_{1.} & \hat{x}_{1n} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \hat{x}_{23} & \hat{x}_{2.} & \hat{x}_{2n} \\ \hat{x}_{31} & \hat{x}_{32} & \hat{x}_{33} & \hat{x}_{3.} & \hat{x}_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{x}_{m1} & \hat{x}_{m2} & \hat{x}_{m3} & \hat{x}_{m.} & \hat{x}_{mn} \end{matrix} \end{matrix}, \hat{w} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_n] \quad (3)$$

Şeklinde ifade edilir.

Burda her i, j için xjk ve j=1, 2, ..., n için wj dilsel değişken olup, bu dilsel değişkenler xjk = (aij, bij, cij) ve wj = (wj1, wj2, wj3) gibi üçgensel bulanık sayılar ile tanımlanabilir. D Bulanık Karar Matrisi'ni W ise Karar Kriterlerinin Önem Ağırlıkları Matrisi'ni göstermektedir.

Bulanık karar matrisinin oluşturulmasından sonraki adım, karar matrisinin normalize edilmesidir. Bulanık karar matrisine aşağıda verilen formüller uygulanarak, normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edilir. Normalize edilmiş bulanık karar matrisi \hat{R} ile gösterilir ve

$$\hat{R} = [\hat{T}_{ij}], i = 1,2, \dots, m, j = 1,2, \dots, n \quad (4)$$

Şeklinde ifade edilir.

Karar kriterleri, fayda ve maliyet kriteri olarak ikiye ayrılabilir. Burada B fayda kriterini ve C maliyet kriterinin göstermekte olup,

$$\hat{T}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j}, \frac{b_{ij}}{c_j}, \frac{c_{ij}}{c_j} \right), j = Bt, Cj = \max_t Cj \quad (5)$$

$$\hat{T}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{A_j}, \frac{b_{ij}}{A_j}, \frac{c_{ij}}{A_j} \right), j = Ct, A_j = \min_t A_j \quad (6)$$

Formülü kullanılarak hesaplanır.

Normalize bulanık karar matrisinin oluşturulmasından sonra, her bir karar kriterinin farklı önem ağırlığına sahip olabileceği dikkate alınarak, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi:

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1,2, \dots, m_i \quad j = 1,2, \dots, n_i \quad (7)$$

Şeklinde ifade edilir. Bu matrisin elemanları ise,

$$\tilde{v}_{ij} = \hat{r}_{ij}(\cdot) \hat{w}_j \quad (8)$$

Formülüyle hesaplanır.

Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisine göre her i, j için \tilde{v}_{ij} elemanları normalize edilmiş pozitif üçgen bulanık sayılardır ve $[0,1]$ aralığında yer alırlar.

Bulanık Pozitif İdeal Çözüm (A^+) ve Bulanık Negatif İdeal Çözüm (A^-);

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+) \quad (9)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (10)$$

Şeklinde tanımlanır.

Her alternatif pozitif ideal çözüm (A^*) ve negatif ideal çözümden (A^-) olan uzaklıkları sırasıyla;

$$D_t^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), \quad t=1,2, \dots, m, \quad (11)$$

$$D_t^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), \quad t=1,2, \dots, m, \quad (12)$$

Formülleri ile hesaplanır.

Burada $d(\dots, \dots)$ iki bulanık sayı arasındaki uzaklığı göstermektedir ve Vertex Yöntemi formülü ile hesaplanmaktadır.

$$d(\hat{m}, \hat{n}) = \sqrt{\frac{[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]}{3}} \quad (13)$$

Pozitif ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar hesaplandıktan sonra, alternatifler arasında sıralamanın belirlenmesi için her alternatife yakınlık katsayıları hesaplanır. Her alternatif için yakınlık katsayısı:

$$CC_t = \frac{d^-}{(D_t^+ - D_t^-)}, \quad t = 1,2, \dots, m \quad (14)$$

İle hesaplanır.

CC_i 1'e yaklaştıkça adayın tercih edilme şansı çok yüksektir. Her alternatifin durumunu belirlemek için $[0,1]$ aralığında beş alt grubu bölünerek dilsel değişkenler tanımlanmıştır.

Tablo 4: Kabul koşulları (Chen vd., 2006)

Yakınlık Katsayısı CCI		Değerlendirme Durumu
CCCI	[0 ,0.2)	Tavsiye edilmez.
CCCI	[0.2,0.4)	Yüksek risk ile tavsiye edilir.
CCCI	[0.4,0.6)	Düşük risk ile tavsiye edilir.
CCCI	[0.6,0.8)	Kabul edilir.
CCCI	[0.8,1.0)	Kabul edilir ve tercih edilir.

İki alternatifin değerlendirme durumunda aynı sınıfa girmesi halinde, sıralamayı belirlemek için yakınlık katsayılarına bakılır. (Chen vd., 2006) Verilen bilgiler çerçevesinde BTOPSIS yönteminin algoritması adım adım aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Chen, 2000):

Adım 1: Karar vericilerin oluşturduğu jürinin, alternatiflerin ve seçim kriterlerinin belirlenmesi

Adım 2: Karar vericilerin karar kriterlerini ve karar kriterlerine göre alternatifleri dilsel değişkenlerle değerlendirmesi

Adım 3: Kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi

Adım 4: Bulanık karar matrisinin ve normalize edilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulması

Adım 5: Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulması

Adım 6: Bulanık pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi

Adım 7: Bulanık ideal çözümlerden uzaklıkların hesaplanması

Adım 8: Yakınlık katsayılarının hesaplanması

Adım 9: Alternatiflerin sıralanması

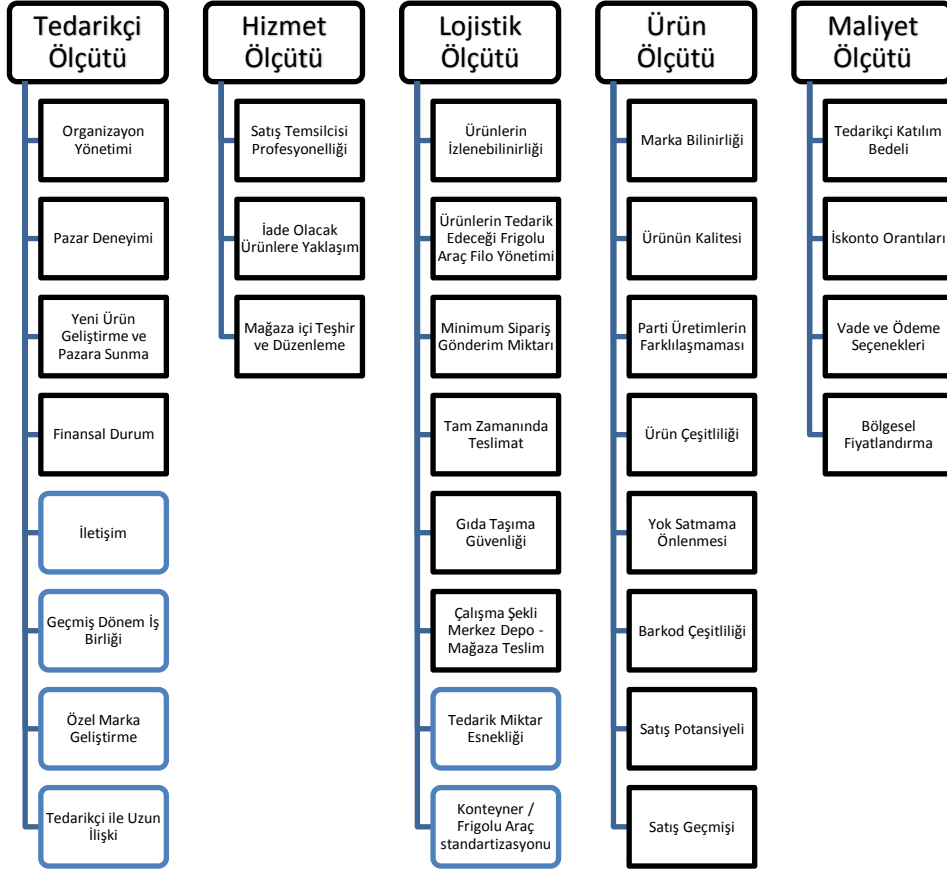
4. UYGULAMA

Uygulama Denizli’de 3 farklı yerel market zincirleri ziyaret edilerek Süt ve Süt ürünleri tedarikçilerinin seçimi ile ilgili görüşmeler yapılmıştır. Belirlenen 5 ana kriter ve toplamda 31 alt kriter 5 farklı tedarikçi arasından en uygunu seçilmek istenmiştir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden BTOPSIS yöntemi ile çözülmüştür. Uygulanan yöntemde BTOPSIS yöntemlerinden beşli Chen algoritması kullanılmıştır.

Adım 1: Karar vericilerin oluşturduğu jürinin, alternatiflerin ve seçim kriterlerinin belirlenmesi

Üç farklı yerel market zincirinden 7 süt ve süt ürünlerin satın alınmasından sorumlu 7 farklı uzmana belirlemiş olduğumuz beş ana kriter ve otuz bir alt kriterlerle ilgili fikirleri sorulmuştur. Yapılan anketlerde uzmanlardan istenilen önem derecesine göre kriter ve alt kriterlere uygun birden (Az Önemli) beşe (Çok Önemli) kadar numaralandırılması istenilmiştir.

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA



Şekil 2: Ana ve alt kriter tablosu

Adım 2: Karar vericilerin karar kriterlerini ve karar kriterlerine göre alternatifleri dilsel değişkenlerle değerlendirmesi

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Tablo 5: Karar vericilerin karar kriterleri

Ana Kriterler ve Alt Kriterler		Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Uzman 7
Tedarikçi Ölçütü	Organizasyon Yönetimi	4	5	5	3	5	4	5
	Pazar Deneyimi	5	4	5	5	5	3	3
	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazar Sunma	5	4	4	5	4	3	3
	Finansal Durum	4	4	5	5	3	3	4
	İletişim	5	5	5	5	5	5	5
	Geçmiş Dönem İş Birliği	3	4	4	5	5	5	4
	Özel Marka Geliştirme	3	3	4	5	3	3	3
	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	3	5	4	4	3	4	4
Hizmet Ölçütü	Satış temsilcisi Profesyonelliği	5	5	4	5	5	5	5
	İade Olacak Ürünler Yaklaşım	5	5	5	5	5	4	5
	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	4	4	5	4	4	4	4
Lojistik Ölçütü	Ürünlerin izlenebilirliği	3	5	5	3	3	5	5
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	4	5	5	5	5	5	5
	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	2	1	5	1	1	3	1
	Tam Zamanında Teslimat	5	5	5	5	5	5	5
	Gıda Taşıma Güvenliği	4	4	5	4	4	5	4
	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	5	5	5	5	5	5	5
	Tedarik Miktar Esnekliği	2	1	4	4	5	3	1
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrazasyonu	5	5	5	5	5	4	5
Ürün Ölçütü	Marka Bilinirliği	3	3	5	4	3	4	3
	Ürün Kalitesi	5	5	5	5	5	5	5
	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	4	5	5	2	4	4	4
	Ürün Çeşitliliği	3	4	4	1	5	2	2
	Yok Satmama Önlenmesi	5	5	5	5	5	5	5
	Barkod Çeşitliliği	3	1	4	1	2	3	2
	Satış Potansiyeli	5	3	5	5	5	5	4
	Satış Geçmiş	4	3	5	5	5	4	4
Maliyet Ölçütü	Tedarikçi Katılım Bedeli	4	1	5	5	5	4	5
	İskonto Oranları	5	5	4	5	5	4	5
	vade ve Ödeme Seçenekleri	5	5	5	5	5	5	5
	Bölgesel Fiyatlandırma	4	5	4	5	4	4	5

Tablo 6: Karar vericilerin değerlendirme sonuçlarının üçgen bulanık sayılar şeklinde ifadesi

Ana Kriterler ve Alt Kriterler	Uzman 1			Uzman 2			Uzman 3			Uzman 4			Uzman 5			Uzman 6			Uzman 7							
	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3	Ait.1	Ait.2	Ait.3					
Tedarikçi Ölçütü	Organizasyon Yönetimi	5	4	4	3	2	5	3	4	2	2	5	4	4	3	4	5	4	4	2	5	4	4	3	3	
	Pazar Deneyimi	5	5	4	3	2	5	5	4	4	2	5	4	4	3	5	4	4	3	2	5	5	5	3	2	
	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazar Sunma	4	4	4	2	2	5	2	4	3	2	5	4	4	3	5	4	4	3	3	5	5	5	2	2	
	Finansal Durum	5	5	4	2	1	5	3	5	2	1	5	4	5	2	2	4	4	2	3	5	4	3	3	5	2
	İletişim	5	4	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5	5	4	3	4	5	5	5	5	4	5	5	4	5
	Geçmiş Dönem İş Birliği	5	3	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	2	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
	Özel Marka Geliştirme	5	2	4	2	5	5	5	5	5	4	1	5	5	2	4	5	5	5	5	2	3	5	5	4	2
	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	5	3	3	3	5	3	5	5	5	3	5	1	5	3	4	5	5	5	5	5	4	5	3	4	5
Hizmet Ölçütü	Satış temsilcisi Profesyonelliği	5	4	5	3	3	5	4	5	4	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	
	İade Olacak Ürünler Yaklaşım	3	2	4	5	5	1	5	5	3	3	5	5	3	5	4	5	5	4	4	4	5	5	4	4	
	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	4	5	5	3	2	5	3	5	3	3	3	3	4	2	5	4	3	2	4	4	4	2	3	3	4
Lojistik Ölçütü	Ürünlerin izlenebilirliği	5	5	4	3	3	5	4	5	3	2	5	5	3	2	5	5	2	2	5	5	3	5	3	5	4
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	5	5	4	3	2	5	5	3	5	3	5	5	2	2	5	5	4	2	3	5	5	3	2	5	
	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	3	4	4	3	5	4	4	5	5	3	2	4	5	5	2	5	3	5	3	4	4	5	3	3	5
	Tam Zamanında Teslimat	4	2	4	5	5	5	2	5	4	1	5	5	5	4	5	2	5	5	5	4	3	2	4	4	3
	Gıda Taşıma Güvenliği	5	5	5	5	5	4	5	2	4	5	5	4	3	5	4	5	3	3	5	4	2	5	5	5	4
	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	5	5	4	5	5	5	2	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	3	5	3	5	5
	Tedarik Miktar Esnekliği	2	2	3	5	5	3	3	3	3	9	5	4	2	5	5	2	4	3	5	3	5	3	5	3	4
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrazasyonu	5	5	4	5	2	5	5	3	3	5	5	5	3	5	5	3	2	5	5	3	2	4	5	4	5
Ürün Ölçütü	Marka Bilinirliği	5	5	3	1	5	5	3	3	5	4	5	3	1	5	5	2	2	5	5	3	2	5	5	4	3
	Ürün Kalitesi	5	5	4	4	5	5	5	5	5	4	3	5	4	5	4	3	4	5	4	3	5	5	3	2	5
	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	5	5	2	2	5	5	2	2	5	5	4	3	5	5	5	2	3	5	5	5	2	3	5	5	4
	Ürün Çeşitliliği	4	5	4	3	1	4	5	3	3	5	5	1	1	5	4	5	2	2	5	4	3	2	5	5	4
	Yok Satmama Önlenmesi	2	3	4	5	2	3	2	5	3	2	5	5	4	3	3	5	5	5	4	3	3	5	3	3	5
	Barkod Çeşitliliği	5	5	4	2	1	5	5	3	2	5	5	1	1	5	5	5	2	5	5	2	1	4	5	2	1
	Satış Potansiyeli	5	4	4	3	3	5	5	3	3	5	5	2	1	5	5	3	2	5	5	3	2	5	5	5	3
	Satış Geçmiş	5	4	5	3	5	5	5	3	5	5	5	2	1	5	5	5	5	4	3	4	4	5	5	4	3
Maliyet Ölçütü	Tedarikçi Katılım Bedeli	4	3	5	3	4	5	4	5	4	5	3	5	5	4	4	4	4	4	4	5	4	5	4	4	4
	İskonto Oranları	3	3	5	3	4	5	5	4	4	3	5	5	4	4	4	4	4	4	4	5	3	5	4	5	4
	vade ve Ödeme Seçenekleri	3	4	5	3	4	5	5	5	3	4	5	3	4	4	4	4	4	4	4	5	3	5	3	4	4
	Bölgesel Fiyatlandırma	5	3	4	5	4	5	4	4	3	4	3	3	5	5	3	5	4	5	4	5	3	5	4	4	4

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Tablo 7: Karar vericilerin alternatifleri dilsel değişkenlerle değerlendirilmesi

		Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Uzman 7
Organizasyon Yönetimi	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	4	3	4	4	4	5	4
	A3	4	4	4	4	4	4	4
	A4	3	2	3	4	3	3	3
	A5	2	2	4	2	2	2	3
Pazar Deneyimi	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	5	4	4	4	5	5
	A3	4	4	4	4	4	4	4
	A4	3	4	2	4	3	3	3
	A5	2	2	3	3	2	2	2
Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	A1	4	5	3	3	5	5	5
	A2	4	4	4	3	4	4	5
	A3	4	4	2	2	4	4	5
	A4	2	2	1	4	3	2	2
	A5	2	2	1	4	3	2	2
Finansal Durum	A1	5	5	5	4	5	5	5
	A2	5	3	4	4	4	5	5
	A3	4	5	5	4	3	4	2
	A4	2	2	2	2	3	3	2
	A5	1	1	2	3	3	3	2
İletişim	A1	5	5	5	4	5	5	5
	A2	4	1	2	3	5	5	4
	A3	5	5	5	4	4	2	4
	A4	5	5	5	5	5	5	5
	A5	5	5	5	5	4	5	4
Geçmiş Dönem İş Birliği	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	3	5	5	2	5	5	4
	A3	5	5	3	5	4	5	4
	A4	5	5	5	5	5	5	5
	A5	5	5	5	5	5	4	4
Özel Marka Geliştirme	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	2	2	2	2	2	5	4
	A3	4	5	4	4	5	4	4
	A4	2	5	1	5	2	3	2
	A5	5	5	5	5	3	5	1
Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	3	3	3	3	5	5	4
	A3	3	5	5	4	5	3	4
	A4	3	3	1	5	4	3	4
	A5	5	5	5	4	4	3	4
Satış temsilcisi Profesyonelliği	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	4	4	3	4	5	4	4
	A3	5	5	5	3	2	5	4
	A4	3	4	2	5	5	5	5
	A5	3	3	5	3	3	4	4
İade Olacak Ürünlere Yaklaşım	A1	3	3	3	3	3	4	4
	A2	2	1	3	5	4	5	4
	A3	4	5	5	4	4	2	4
	A4	5	5	5	5	5	5	5
	A5	5	5	5	5	5	5	5
Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	A1	4	5	3	5	4	4	4
	A2	5	3	3	4	4	2	5
	A3	5	3	3	4	3	2	3
	A4	3	3	4	3	2	3	3
	A5	2	3	2	2	3	3	3
Ürünlerin izlenebilirliği	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	4	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	4	5	3	4
	A4	3	2	3	2	2	5	3
	A5	3	2	3	2	2	3	3
Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	5	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	4	5	4	3
	A4	3	3	2	3	3	4	3
	A5	2	5	2	3	2	2	2
Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	A1	3	4	3	3	3	3	3
	A2	4	4	2	5	4	4	4
	A3	4	4	4	3	4	2	3
	A4	3	5	5	5	5	4	5
	A5	5	5	5	5	5	3	4
Tam Zamanında Teslimat	A1	4	5	4	4	5	4	4
	A2	2	5	1	5	4	3	3
	A3	4	5	5	2	3	4	4
	A4	5	2	5	5	5	4	5
	A5	5	5	5	5	5	4	5
Gıda Taşıma Güvenliği	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	4	5	4	5	5	5
	A3	5	5	5	5	4	2	5
	A4	5	2	4	3	4	5	4
	A5	5	4	3	3	2	3	3
Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	A1	5	5	5	4	2	5	5
	A2	5	5	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	5	5	3	5
	A4	5	2	5	5	5	3	5
	A5	5	5	5	5	5	4	5
Tedarik Miktar Esnekliği	A1	2	3	4	2	3	3	4
	A2	2	3	2	4	5	3	3
	A3	3	3	3	3	3	4	4
	A4	5	5	5	5	5	5	5
	A5	5	5	5	5	5	4	5
Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	A1	5	5	5	5	5	4	5
	A2	5	5	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	5	5	4	5
	A4	5	3	5	3	3	3	3
	A5	2	3	3	2	2	4	2
Marka Bilinirliği	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	5	4	5	5	5	4
	A3	5	5	5	5	5	5	5
	A4	3	3	3	2	3	2	3
	A5	1	3	1	2	2	2	2
Ürün Kalitesi	A1	5	5	5	5	4	5	4
	A2	5	5	4	4	5	5	4
	A3	4	5	5	5	5	5	4
	A4	4	5	4	4	4	3	3
	A5	4	3	3	3	2	2	2
Parti Üretimlerinin Farklaşmaması	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	5	5	5	5	5	5
	A3	2	5	3	4	5	2	3
	A4	2	2	4	2	2	2	2
	A5	2	2	3	3	3	3	2
Ürün Çeşitliliği	A1	4	4	5	5	5	5	5
	A2	5	5	5	4	5	5	5
	A3	4	3	5	4	5	4	5
	A4	3	3	1	2	3	5	3
	A5	1	5	1	2	3	5	1
Yok Satmama Önlenmesi	A1	2	2	3	4	2	3	3
	A2	3	3	2	3	4	3	3
	A3	4	2	5	3	3	3	3
	A4	5	5	5	5	5	5	5
	A5	5	5	5	5	4	5	5
Barkod Çeşitliliği	A1	5	5	5	5	5	4	5
	A2	5	5	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	5	5	4	5
	A4	2	3	1	5	2	2	2
	A5	1	2	1	2	1	1	1
Satış Potansiyeli	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	4	5	5	5	5	5	5
	A3	4	5	5	3	3	5	5
	A4	3	3	2	3	3	4	3
	A5	3	3	1	2	2	3	2
Satış Geçmişi	A1	5	5	5	5	5	5	5
	A2	5	5	5	5	5	3	5
	A3	5	5	5	5	5	5	5
	A4	3	3	2	5	4	4	3
	A5	3	3	1	1	4	3	3
Tedarikçi Katılım Bedeli	A1	4	4	5	4	4	5	4
	A2	3	5	3	5	4	5	4
	A3	5	4	5	4	4	4	4
	A4	3	5	5	5	5	4	5
	A5	4	4	5	2	4	4	4
İskonto Oranları	A1	3	5	4	4	4	5	4
	A2	3	5	3	4	4	5	3
	A3	5	4	5	4	4	4	4
	A4	3	5	5	5	5	5	5
	A5	4	4	5	4	3	4	4
vade ve Ödeme Seçenekleri	A1	4	5	4	4	4	5	3
	A2	4	5	3	4	4	5	3
	A3	5	5	4	4	5	4	3
	A4	3	5	5	5	5	5	4
	A5	4	5	4	3	5	4	4
Bölgesel Fiyatlandırma	A1	5	5	3	5	5	5	4
	A2	3	5	4	5	5	5	4
	A3	4	4	3	3	4	3	3
	A4	5	4	3	5	5	5	5
	A5	4	4	5	4	4	4	4

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Kriterlerin önem ağırlıkları tablosunun oluşturabilmesi için karar kriterlerinin sonuçlarını üçgensel bulanık sayılar şeklinde ifadesi Tablo 8 de gösterilmiştir.

Tablo 8: Alternatiflerin değerlendirilme sonuçlarının üçgensel bulanık sayılar şeklinde ifadesi

	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Uzman 4	Uzman 5	Uzman 6	Uzman 7
Organizasyon Yönetimi	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
Pazar Deneyimi	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
Yeni Ürün Geliştirme ve Pazar Sunma	A1 (3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)
Finansal Durum	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
	A3 (1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)
İletişim	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
Geçmiş Dönem İş Birliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Özel Marka Geliştirme	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(1/2, 1, 3/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Satış temsilcisi Profesyonelliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
İade Olacak Ürünlere Yaklaşım	A1 (3/2, 2, 5/2)	(1/2, 1, 3/2)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
	A2 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Ürünlerin İzlenebilirliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)
Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	A1 (3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Tam Zamanında Teslimat	A1 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Gıda Taşıma Güvenliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Tedarik Miktar Esnekliği	A1 (1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)
	A2 (1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Konteyner / Frigolu Araç Standtrazasyonu	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)
Marka Bilinirliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Ürün Kalitesi	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
Ürün Çeşitliliği	A1 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
Yok Satmama Önlenmesi	A1 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)
Barkod Çeşitliliği	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(1/2, 1, 3/2)	(5/2, 3, 7/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)
Satış Potansiyeli	A1 (1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)
	A2 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
Satış Geçmişi	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)
Tedarikçi Katılım Bedeli	A1 (2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
	A3 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
İskonto Oranları	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
vade ve Ödeme Seçenekleri	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
Bölgesel Fiyatlandırma	A1 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A2 (5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)
	A3 (2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(2				

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Alternatiflerin değerlendirilmesi sonuçlarının üçgensel bulanık sayılar ile gösterilmesi Ek-1 de gösterilmiştir.

Adım 3: Kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi

Tablo 9: Karar kriterlerinin önem ağırlıkları

Tedarikçi Ölçütü	Organizasyon Yönetimi	2,21	2,71	3,21
	Pazar Deneyimi	2,14	2,64	3,14
	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	2,00	2,50	3,00
	Finansal Durum	2,00	2,50	3,00
	İletişim	2,50	3,00	3,50
	Geçmiş Dönem İş Birliği	2,14	2,64	3,14
	Özel Marka Geliştirme	1,71	2,21	2,71
	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	1,93	2,43	2,93
Hizmet Ölçütü	Satış temsilcisi Profesyonelliği	2,43	2,93	3,43
	İade Olacak Ürünler Yaklaşım	2,43	2,93	3,43
	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	2,07	2,57	3,07
Lojistik Ölçütü	Ürünlerin izlenebilirliği	2,07	2,57	3,07
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	2,43	2,93	3,43
	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	1,00	1,50	2,00
	Tam Zamanında Teslimat	2,50	3,00	3,50
	Gıda Taşıma Güvenliği	2,14	2,64	3,14
	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	2,50	3,00	3,50
	Tedarik Miktar Esnekliği	1,43	1,93	2,43
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	2,43	2,93	3,43
Ürün Ölçütü	Marka Bilinirliği	1,79	2,29	2,79
	Ürün Kalitesi	2,50	3,00	3,50
	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	2,00	2,50	3,00
	Ürün Çeşitliliği	1,50	2,00	2,50
	Yok Satmama Önlenmesi	2,50	3,00	3,50
	Barkod Çeşitliliği	1,14	1,64	2,14
	Satış Potansiyeli	2,29	2,79	3,29
	Satış Geçmişi	2,14	2,64	3,14
Maliyet Ölçütü	Tedarikçi Katılım Bedeli	2,07	2,57	3,07
	İskonto Oranları	2,36	2,86	3,36
	vade ve Ödeme Seçenekleri	2,50	3,00	3,50
	Bölgesel Fiyatlandırma	2,21	2,71	3,21

Karar kriterlerinin önem ağırlıkları Tablo 8'den (2) nolu formül ile oluşturulmuştur.

Adım 4: Bulanık karar matrisinin ve normalize edilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulması

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Bulanık karar matrisinin oluşturabilmesi için Tablo 6'dan yararlanılmıştır. Tablo 6 da bulunan değerler (2) nolu formül yardımı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan bulanık karar matrisi Tablo 9 da gösterilmiştir.

Tablo 10: Bulanık karar matrisi

	Organizasyon Yönetimi	Pazar Deneyimi	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	Finansal Durum	İletişim	Geçmiş Dönem İş Birliği	
A1	2,5 .3 .3,5	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,5 .3 .3,5	
A2	2 .2,5 .3	2,3 .2,8 .3,3	1,9 .2,4 .2,9	2,1 .2,6 .3,1	1,7 .2,2 .2,7	2,1 .2,6 .3,1	
A3	2 .2,5 .3	2,1 .2,6 .3,1	1,8 .2,3 .2,8	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1	2,3 .2,8 .3,3	
A4	1,5 .2 .2,5	1,6 .2,1 .2,6	1,2 .1,7 .2,2	1,1 .1,6 .2,1	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	
A5	1,2 .1,7 .2,2	1,1 .1,6 .2,1	1,1 .1,6 .2,1	1,1 .1,6 .2,1	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	
	Özel Marka Geliştirme	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	Satış temsilcisi Profesyonelliği	İade Olacak Ürünlere Yaklaşım	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	Ürünlerin izlenebilirliği	
A1	2,5 .3 .3,5	2,5 .3 .3,5	2,5 .3 .3,5	1,9 .2,4 .2,9	2,1 .2,6 .3,1	2,5 .3 .3,5	
A2	2 .2,5 .3	1,9 .2,4 .2,9	2,1 .2,6 .3,1	1,7 .2,2 .2,7	2,1 .2,6 .3,1	2,4 .2,9 .3,4	
A3	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1	2 .2,5 .3	2 .2,5 .3	2,1 .2,6 .3,1	
A4	1,4 .1,9 .2,4	2 .2,5 .3	2,1 .2,6 .3,1	2,5 .3 .3,5	1,5 .2 .2,5	1,5 .2 .2,5	
A5	1,9 .2,4 .2,9	2,2 .2,7 .3,2	2,1 .2,6 .3,1	2,4 .2,9 .3,4	1,3 .1,8 .2,3	1,1 .1,6 .2,1	
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	Tam Zamanında Teslimat	Gıda Taşıma Güvenliği	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	Tedarik Miktar Esnekliği	
A1	2,5 .3 .3,5	1,5 .2 .2,5	2,1 .2,6 .3,1	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	1,5 .2 .2,5	
A2	2,5 .3 .3,5	1,9 .2,4 .2,9	1,6 .2,1 .2,6	2,4 .2,9 .3,4	2,5 .3 .3,5	1,6 .2,1 .2,6	
A3	2,3 .2,8 .3,3	1,7 .2,2 .2,7	1,8 .2,3 .2,8	2,2 .2,7 .3,2	2,3 .2,8 .3,3	1,8 .2,3 .2,8	
A4	1,4 .1,9 .2,4	2,3 .2,8 .3,3	2,2 .2,7 .3,2	1,9 .2,4 .2,9	2,3 .2,8 .3,3	2,5 .3 .3,5	
A5	1,3 .1,8 .2,3	2,3 .2,8 .3,3	2,4 .2,9 .3,4	1,6 .2,1 .2,6	2,3 .2,8 .3,3	2,4 .2,9 .3,4	
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	Marka Bilinirliği	Ürün Kalitesi	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	Ürün Çeşitliliği	Yok Satmama Önlenmesi	
A1	2,4 .2,9 .3,4	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	1,6 .2,1 .2,6	
A2	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	2,3 .2,8 .3,3	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	1,5 .2 .2,5	
A3	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,1 .2,6 .3,1	1,6 .2,1 .2,6	
A4	1,9 .2,4 .2,9	1,4 .1,9 .2,4	1,9 .2,4 .2,9	1,2 .1,7 .2,2	1,4 .1,9 .2,4	2,5 .3 .3,5	
A5	1,3 .1,8 .2,3	0,9 .1,4 .1,9	1,4 .1,9 .2,4	1,3 .1,8 .2,3	1,1 .1,6 .2,1	2,4 .2,9 .3,4	
	Barkod Çeşitliliği	Satış Potansiyeli	Satış Geçmişi	Tedarikçi Katılım Bedeli	İskonto Oranları	vade ve Ödeme Seçenekleri	Bölgesel Fiyatlandırma
A1	2,4 .2,9 .3,4	2,5 .3 .3,5	2,5 .3 .3,5	2,2 .2,7 .3,2	2,1 .2,6 .3,1	2 .2,5 .3	2,3 .2,8 .3,3
A2	2,5 .3 .3,5	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,1 .2,6 .3,1	1,9 .2,4 .2,9	2 .2,5 .3	2,2 .2,7 .3,2
A3	2,4 .2,9 .3,4	2,3 .2,8 .3,3	2,4 .2,9 .3,4	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1	1,8 .2,3 .2,8
A4	1,2 .1,7 .2,2	1,5 .2 .2,5	1,7 .2,2 .2,7	2,4 .2,9 .3,4	2,4 .2,9 .3,4	2,3 .2,8 .3,3	2,3 .2,8 .3,3
A5	0,6 .1,1 .1,6	1,1 .1,6 .2,1	1,6 .2,1 .2,6	2,1 .2,6 .3,1	2 .2,5 .3	2,1 .2,6 .3,1	2,1 .2,6 .3,1

Normalize edilmiş bulanık karar matrisi lineer normalizasyon gereği (3), (4), (5) ile belirtilen formüller uygulanmıştır. Fayda kriteri için (4) olarak gösterilen formülde üçgen bulanık sayıların üçüncü bileşenlerinin en büyüğü (c_{ij}), maliyet kriteri için ise (5) ile gösterilen üçgensel bulanık sayıların birinci bileşenlerinin en küçük değeri ile normalize edilir. Normalize edilmiş bulanık karar matrisi Tablo 11 de gösterilmiştir.

Tablo 11: Normalize edilmiş karar matrisi

	Organizasyon Yönetimi	Pazar Deneyimi	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	Finansal Durum	İletişim	Geçmiş Dönem İş Birliği	
A1	0,5 .0,6 .0,7	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,5 .0,6 .0,7	
A2	0,4 .0,5 .0,6	0,46 .0,56 .0,66	0,38 .0,48 .0,58	0,42 .0,52 .0,62	0,34 .0,44 .0,54	0,42 .0,52 .0,62	
A3	0,4 .0,5 .0,6	0,42 .0,52 .0,62	0,36 .0,46 .0,56	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62	0,46 .0,56 .0,66	
A4	0,3 .0,4 .0,5	0,32 .0,42 .0,52	0,24 .0,34 .0,44	0,22 .0,32 .0,42	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	
A5	0,24 .0,34 .0,44	0,22 .0,32 .0,42	0,22 .0,32 .0,42	0,22 .0,32 .0,42	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	
	Özel Marka Geliştirme	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	Satış temsilcisi Profesyonelliği	İade Olacak Ürünler Yaklaşım	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	Ürünlerin izlenebilirliği	
A1	0,5 .0,6 .0,7	0,5 .0,6 .0,7	0,5 .0,6 .0,7	0,38 .0,48 .0,58	0,42 .0,52 .0,62	0,5 .0,6 .0,7	
A2	0,4 .0,5 .0,6	0,38 .0,48 .0,58	0,42 .0,52 .0,62	0,34 .0,44 .0,54	0,42 .0,52 .0,62	0,48 .0,58 .0,68	
A3	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62	0,4 .0,5 .0,6	0,4 .0,5 .0,6	0,42 .0,52 .0,62	
A4	0,28 .0,38 .0,48	0,4 .0,5 .0,6	0,42 .0,52 .0,62	0,5 .0,6 .0,7	0,3 .0,4 .0,5	0,3 .0,4 .0,5	
A5	0,38 .0,48 .0,58	0,44 .0,54 .0,64	0,42 .0,52 .0,62	0,48 .0,58 .0,68	0,26 .0,36 .0,46	0,22 .0,32 .0,42	
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	Tam Zamanında Teslimat	Gıda Taşıma Güvenliği	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	Tedarik Miktar Esnekliği	
A1	0,5 .0,6 .0,7	0,3 .0,4 .0,5	0,42 .0,52 .0,62	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,3 .0,4 .0,5	
A2	0,5 .0,6 .0,7	0,38 .0,48 .0,58	0,32 .0,42 .0,52	0,48 .0,58 .0,68	0,5 .0,6 .0,7	0,32 .0,42 .0,52	
A3	0,46 .0,56 .0,66	0,34 .0,44 .0,54	0,36 .0,46 .0,56	0,44 .0,54 .0,64	0,46 .0,56 .0,66	0,36 .0,46 .0,56	
A4	0,28 .0,38 .0,48	0,46 .0,56 .0,66	0,44 .0,54 .0,64	0,38 .0,48 .0,58	0,46 .0,56 .0,66	0,5 .0,6 .0,7	
A5	0,26 .0,36 .0,46	0,46 .0,56 .0,66	0,48 .0,58 .0,68	0,32 .0,42 .0,52	0,46 .0,56 .0,66	0,48 .0,58 .0,68	
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	Marka Bilinirliği	Ürün Kalitesi	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	Ürün Çeşitliliği	Yok Satmama Önlenmesi	
A1	0,48 .0,58 .0,68	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,32 .0,42 .0,52	
A2	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,46 .0,56 .0,66	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,3 .0,4 .0,5	
A3	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,42 .0,52 .0,62	0,32 .0,42 .0,52	
A4	0,38 .0,48 .0,58	0,28 .0,38 .0,48	0,38 .0,48 .0,58	0,24 .0,34 .0,44	0,28 .0,38 .0,48	0,5 .0,6 .0,7	
A5	0,26 .0,36 .0,46	0,18 .0,28 .0,38	0,28 .0,38 .0,48	0,26 .0,36 .0,46	0,22 .0,32 .0,42	0,48 .0,58 .0,68	
	Barkod Çeşitliliği	Satış Potansiyeli	Satış Geçmiş	Tedarikçi Katılım Bedeli	İskonto Oranları	vade ve Ödeme Seçenekleri	Bölgesel Fiyatlandırma
A1	0,48 .0,58 .0,68	0,5 .0,6 .0,7	0,5 .0,6 .0,7	0,44 .0,54 .0,64	0,42 .0,52 .0,62	0,4 .0,5 .0,6	0,46 .0,56 .0,66
A2	0,5 .0,6 .0,7	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,42 .0,52 .0,62	0,38 .0,48 .0,58	0,4 .0,5 .0,6	0,44 .0,54 .0,64
A3	0,48 .0,58 .0,68	0,46 .0,56 .0,66	0,48 .0,58 .0,68	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62	0,36 .0,46 .0,56
A4	0,24 .0,34 .0,44	0,3 .0,4 .0,5	0,34 .0,44 .0,54	0,48 .0,58 .0,68	0,48 .0,58 .0,68	0,46 .0,56 .0,66	0,46 .0,56 .0,66
A5	0,12 .0,22 .0,32	0,22 .0,32 .0,42	0,32 .0,42 .0,52	0,42 .0,52 .0,62	0,4 .0,5 .0,6	0,42 .0,52 .0,62	0,42 .0,52 .0,62

Adım 5: Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulması

Her bir kriterin uzmanlar tarafından farklı önem ağırlıklarına sahiptir. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık matris (7) ve (8) numaralı formül uygulanarak, Normalize edilmiş bulanık karar matrisindeki her alternatif için kriterlere verilen değerler, buldukları sütundaki kriterlerin ağırlıkları ile çarpılmıştır. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık matrisi oluşturulmaktadır. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık matris Tablo 12 de gösterilmiştir.

Tablo 12: Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi

	Organizasyon Yönetimi	Pazar Deneyimi	Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	Finansal Durum	İletişim	Geçmiş Dönem İş Birliği	
A1	1,11 .1,63 .2,25	1,07 .1,59 .2,2	0,96 .1,45 .2,04	0,96 .1,45 .2,04	1,2 .1,74 .2,38	1,07 .1,59 .2,2	
A2	0,89 .1,36 .1,93	0,99 .1,48 .2,07	0,76 .1,2 .1,74	0,84 .1,3 .1,86	0,85 .1,32 .1,89	0,9 .1,37 .1,95	
A3	0,89 .1,36 .1,93	0,9 .1,37 .1,95	0,72 .1,15 .1,68	0,84 .1,3 .1,86	1,05 .1,56 .2,17	0,99 .1,48 .2,07	
A4	0,66 .1,09 .1,61	0,69 .1,11 .1,63	0,48 .0,85 .1,32	0,44 .0,8 .1,26	1,25 .1,8 .2,45	1,03 .1,53 .2,14	
A5	0,53 .0,92 .1,41	0,47 .0,85 .1,32	0,44 .0,8 .1,26	0,44 .0,8 .1,26	1,2 .1,74 .2,38	1,03 .1,53 .2,14	
	Özel Marka Geliştirme	Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	Satış temsilcisi Profesyonelliği	İade Olacak Ürünler Yaklaşım	Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	Ürünlerin izlenebilirliği	
A1	0,86 .1,33 .1,9	0,96 .1,46 .2,05	1,21 .1,76 .2,4	0,92 .1,41 .1,99	0,87 .1,34 .1,9	1,04 .1,54 .2,15	
A2	0,69 .1,11 .1,63	0,73 .1,17 .1,7	1,02 .1,52 .2,13	0,83 .1,29 .1,85	0,87 .1,34 .1,9	0,99 .1,49 .2,09	
A3	0,72 .1,15 .1,68	0,81 .1,26 .1,82	1,02 .1,52 .2,13	0,97 .1,46 .2,06	0,83 .1,29 .1,84	0,87 .1,34 .1,9	
A4	0,48 .0,84 .1,3	0,77 .1,21 .1,76	1,02 .1,52 .2,13	1,21 .1,76 .2,4	0,62 .1,03 .1,54	0,62 .1,03 .1,54	
A5	0,65 .1,06 .1,57	0,85 .1,31 .1,87	1,02 .1,52 .2,13	1,17 .1,7 .2,33	0,54 .0,93 .1,41	0,46 .0,82 .1,29	
	Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	Tam Zamanında Teslimat	Gıda Taşıma Güvenliği	Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	Tedarik Miktar Esnekliği	
A1	1,21 .1,76 .2,4	0,3 .0,6 .1	1,05 .1,56 .2,17	1,07 .1,59 .2,2	1,2 .1,74 .2,38	0,43 .0,77 .1,21	
A2	1,21 .1,76 .2,4	0,38 .0,72 .1,16	0,8 .1,26 .1,82	1,03 .1,53 .2,14	1,25 .1,8 .2,45	0,46 .0,81 .1,26	
A3	1,12 .1,64 .2,26	0,34 .0,66 .1,08	0,9 .1,38 .1,96	0,94 .1,43 .2,01	1,15 .1,68 .2,31	0,51 .0,89 .1,36	
A4	0,68 .1,11 .1,65	0,46 .0,84 .1,32	1,1 .1,62 .2,24	0,81 .1,27 .1,82	1,15 .1,68 .2,31	0,71 .1,16 .1,7	
A5	0,63 .1,05 .1,58	0,46 .0,84 .1,32	1,2 .1,74 .2,38	0,69 .1,11 .1,63	1,15 .1,68 .2,31	0,69 .1,12 .1,65	
	Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	Marka Bilinirliği	Ürün Kalitesi	Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	Ürün Çeşitliliği	Yok Satmama Önlenmesi	
A1	1,17 .1,7 .2,33	0,89 .1,37 .1,95	1,2 .1,74 .2,38	1 .1,5 .2,1	0,72 .1,16 .1,7	0,8 .1,26 .1,82	
A2	1,21 .1,76 .2,4	0,86 .1,33 .1,89	1,15 .1,68 .2,31	1 .1,5 .2,1	0,72 .1,16 .1,7	0,75 .1,2 .1,75	
A3	1,17 .1,7 .2,33	0,86 .1,33 .1,89	1,2 .1,74 .2,38	0,96 .1,45 .2,04	0,63 .1,04 .1,55	0,8 .1,26 .1,82	
A4	0,92 .1,41 .1,99	0,5 .0,87 .1,34	0,95 .1,44 .2,03	0,48 .0,85 .1,32	0,42 .0,76 .1,2	1,25 .1,8 .2,45	
A5	0,63 .1,05 .1,58	0,32 .0,64 .1,06	0,7 .1,14 .1,68	0,52 .0,9 .1,38	0,33 .0,64 .1,05	1,2 .1,74 .2,38	
	Barkod Çeşitliliği	Satış Potansiyeli	Satış Geçmiş	Tedarikçi Katılım Bedeli	İskonto Oranları	vade ve Ödeme Seçenekleri	Bölgesel Fiyatlandırma
A1	0,55 .0,95 .1,46	1,14 .1,67 .2,3	1,07 .1,59 .2,2	0,91 .1,39 .1,97	0,99 .1,49 .2,08	1 .1,5 .2,1	1,02 .1,52 .2,12
A2	0,57 .0,99 .1,5	1,1 .1,62 .2,23	1,03 .1,53 .2,14	0,87 .1,34 .1,9	0,9 .1,37 .1,95	1 .1,5 .2,1	0,97 .1,47 .2,06
A3	0,55 .0,95 .1,46	1,05 .1,56 .2,17	1,03 .1,53 .2,14	0,87 .1,34 .1,9	0,99 .1,49 .2,08	1,05 .1,56 .2,17	0,8 .1,25 .1,8
A4	0,27 .0,56 .0,94	0,69 .1,11 .1,64	0,73 .1,16 .1,7	0,99 .1,49 .2,09	1,13 .1,66 .2,28	1,15 .1,68 .2,31	1,02 .1,52 .2,12
A5	0,14 .0,36 .0,69	0,5 .0,89 .1,38	0,69 .1,11 .1,63	0,87 .1,34 .1,9	0,94 .1,43 .2,01	1,05 .1,56 .2,17	0,93 .1,41 .1,99

Adım 6: Bulanık pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi

Bulanım pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi için Chen' in önermiş olduğu modele göre bulanık pozitif ideal çözüm (A^+) ve bulanık negatif ideal çözüm için (A^-), 5 ana kriterli ve 31 alt kriterli problem için $n=31$ olduğundan (9) ve (10) numaralı formüller uygulanarak

$$A^+ = \begin{bmatrix} (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), \\ (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), \\ (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), \\ (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), \end{bmatrix}$$

$$A^- = \begin{bmatrix} (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), \\ (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), \\ (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), \\ (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), (0,0,0), \end{bmatrix}$$

Olarak kabul edilmektedir. (Chen, 2000, s:1-9)

Adım 7: Bulanık ideal çözümlerden uzaklıkların hesaplanması

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Karar probleminde, karar kriteri sayısı 31 olduğundan $n=31$ alternatif sayısı 5 olduğundan $m=5$ tir. Bu değerler (11) ve (12) de belirtilen formüller ile hesaplanarak, Vertex yönteminin öngördüğü (15) nolu formül ile hesaplanır.

Vertex Yöntem, bulanık sayılar arasındaki uzaklığı bulmaya yardımcı bir yöntemdir. $M=(m_1, m_2, m_3)$ ve $n=(n_1, n_2, n_3)$ gibi üçgen bulanıksal sayı arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$d(\tilde{m}-\tilde{n}) = \sqrt{\frac{[(m_1-n_1)^2+(m_2-n_2)^2+(m_3-n_3)^2]}{3}} \quad (15)$$

Vertex yöntemi ile BPİÇ ve BNİÇ'ten olan uzaklıklar bulunur. Alternatiflerin tüm BPİÇ' ten olan uzaklıkları Tablo 13' de gösterilmektedir.

Tablo 13: BPİÇ değerleri

	Alt. 1	Alt.2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Organizasyon Yönetimi	0,81	0,58	0,58	0,41	0,36
Pazar Deneyimi	0,77	0,68	0,59	0,41	0,37
Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	0,65	0,46	0,43	0,36	0,37
Finansal Durum	0,65	0,53	0,53	0,37	0,37
İletişim	0,91	0,55	0,75	0,97	0,91
Geçmiş Dönem İş Birliği	0,77	0,59	0,68	0,73	0,73
Özel Marka Geliştirme	0,56	0,41	0,43	0,36	0,39
Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	0,66	0,44	0,51	0,47	0,54
Satış temsilcisi Profesyonelliği	0,93	0,72	0,72	0,72	0,72
İade Olacak Ürünlere Yaklaşım	0,62	0,53	0,67	0,93	0,87
Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	0,56	0,56	0,52	0,38	0,36
Ürünlerin izlenebilirliği	0,73	0,69	0,56	0,38	0,37
Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	0,93	0,93	0,82	0,42	0,40
Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	0,47	0,40	0,43	0,37	0,37
Tam Zamanında Teslimat	0,75	0,51	0,60	0,80	0,91
Gıda Taşıma Güvenliği	0,77	0,73	0,63	0,51	0,41
Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	0,91	0,97	0,86	0,86	0,86
Tedarik Miktar Esnekliği	0,38	0,36	0,36	0,45	0,42
Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	0,87	0,93	0,87	0,62	0,40
Marka Bilinirliği	0,59	0,55	0,55	0,36	0,45
Ürün Kalitesi	0,91	0,86	0,91	0,65	0,44
Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	0,70	0,70	0,65	0,36	0,36
Ürün Çeşitliliği	0,44	0,44	0,38	0,38	0,44
Yok Satmama Önlenmesi	0,51	0,47	0,51	0,97	0,91
Barkod Çeşitliliği	0,37	0,38	0,37	0,49	0,64
Satış Potansiyeli	0,85	0,80	0,75	0,42	0,37
Satış Geçmişi	0,77	0,73	0,73	0,44	0,41
Tedarikçi Katılım Bedeli	0,61	0,56	0,56	0,69	0,56
İskonto Oranları	0,68	0,59	0,68	0,83	0,63
vade ve Ödeme Seçenekleri	0,70	0,70	0,75	0,86	0,75
Bölgesel Fiyatlandırma	0,71	0,67	0,50	0,71	0,62

BNİÇ' ten olan uzaklıkları Tablo 14' de gösterilmektedir.

Tablo 14: BNİÇ değerleri

Organizasyon Yönetimi	1,73	1,46	1,46	1,19	1,02
Pazar Deneyimi	1,68	1,58	1,47	1,21	0,95
Yeni Ürün Geliştirme ve Pazara Sunma	1,55	1,30	1,25	0,95	0,90
Finansal Durum	1,55	1,40	1,40	0,90	0,90
İletişim	1,84	1,42	1,66	1,90	1,84
Geçmiş Dönem İş Birliği	1,68	1,47	1,58	1,63	1,63
Özel Marka Geliştirme	1,43	1,21	1,25	0,94	1,16
Tedarikçi ile Uzun Süreli İlişki	1,56	1,26	1,36	1,31	1,41
Satış temsilcisi Profesyonelliği	1,85	1,62	1,62	1,62	1,62
İade Olacak Ürünlere Yaklaşım	1,50	1,39	1,56	1,85	1,80
Mağaza İçi Teşhir ve Düzenleme	1,43	1,43	1,38	1,13	1,02
Ürünlerin izlenebilirliği	1,64	1,59	1,43	1,13	0,92
Ürünlerin Tedarik Edecek Frigolu Araç Filo Yönetimi	1,85	1,85	1,74	1,21	1,15
Minimum Sipariş Gönderim Miktarı	0,70	0,82	0,76	0,94	0,94
Tam Zamanında Teslimat	1,66	1,36	1,48	1,72	1,84
Gıda Taşıma Güvenliği	1,68	1,63	1,52	1,36	1,21
Çalışma Şekli Merkez Depo - Mağaza Teslim	1,84	1,90	1,78	1,78	1,78
Tedarik Miktar Esnekliği	0,86	0,90	0,98	1,26	1,22
Konteyner / Frigolu Araç Standtrizasyonu	1,80	1,85	1,80	1,50	1,15
Marka Bilinirliği	1,47	1,42	1,42	0,97	0,74
Ürün Kalitesi	1,84	1,78	1,84	1,54	1,24
Parti Üretimlerinin Farklılaşmaması	1,60	1,60	1,55	0,95	1,00
Ürün Çeşitliliği	1,26	1,26	1,14	0,86	0,74
Yok Satmama Önlenmesi	1,36	1,30	1,36	1,90	1,84
Barkod Çeşitliliği	1,05	1,09	1,05	0,65	0,46
Satış Potansiyeli	1,77	1,71	1,66	1,21	0,99
Satış Geçmişi	1,68	1,63	1,63	1,26	1,21
Tedarikçi Katılım Bedeli	1,49	1,43	1,43	1,59	1,43
İskonto Oranları	1,58	1,47	1,58	1,75	1,52
vade ve Ödeme Seçenekleri	1,60	1,60	1,66	1,78	1,66
Bölgesel Fiyatlandırma	1,62	1,56	1,35	1,62	1,51

Alternatiflerin d⁺ ve d⁻ değerleri Tablo 15 de gösterilmiştir.

Tablo 15: D+ ve D- değerleri

	d+	d-
A1	21,57	48,15
A2	19,02	45,29
A3	18,9	45,14
A4	17,68	41,59
A5	16,71	38,77

Adım 8: Yakınlık katsayılarının hesaplanması

Uzaklık değerleri hesaplandıktan sonra yakınlık katsayılarının hesaplanması için (14) nolu formülden yararlanılmıştır. Yakınlık hesaplamaları Tablo 16 de gösterilmiştir.

Tablo 16: Alternatiflerin yakınlık katsayıları

	Cci
A1	0,6907
A2	0,7042
A3	0,7049
A4	0,7017
A5	0,6988

Adım 9: Alternatiflerin sıralanması

Cci değerleri bulunduktan sonra alternatiflerin sıralanması için büyükten küçüğe olacak şekilde sıralanır. Sıralama Tablo 16 da gösterilmektedir. $CC_3 > CC_2 > CC_4 > CC_5 > CC_1$ olarak sıralanmaktadır. Alternatifler ise $A_3 > A_2 > A_4 > A_5 > A_1$ sıralanmaktadır.

Tablo 17: Alternatiflerin sıralanması

	Cci	Sıralama
A1	0,6907	5
A2	0,7042	2
A3	0,7049	1
A4	0,7017	3
A5	0,6988	4

Chen' in 2000 yılında alternatiflerin kabul koşullarına bakılarak (Tablo 3) tüm alternatiflerin kabul edilebilir olduğu gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Tedarikçi seçimi ve tedarik zincirinin yönetimi işletmeler için günümüz rekabet koşullarında her zamankinden daha önemlidir. Özellikle çok fazla ürün çeşidi ve çok sayıda tedarikçinin söz konusu olduğu perakende sektöründe ve mağazacılıkta doğru karar vermek gerekmektedir. Tecrübeye dayalı yöntemler yerine analitik yöntemleri kullanarak yönetilen bir süreç uzun dönemde müşteri memnuniyeti ve karlılığı birlikte getirecektir.

Bu çalışmada perakende sektöründe bulunan 3 yerel firmanın 5 farklı tedarikçiyi seçmekte BTOPSIS ile çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Tedarikçiler ile ilgili 5 ana kriter ve 31 alt kriter belirlenmiş ve süt ve süt ürünlerinin satın almasını yapan 7 farklı uzmana sorulmuştur. Firmalar ile ilgili tedarikçi ölçütü, hizmet ölçütü, lojistik ölçütü, ürün ölçütü ve maliyet ölçütü ile ilgili deneyimlerinden faydalanılmıştır.

Çalışmada uzmanların görüşleri doğrultusunda karar kriterlerinin ağırlıkları büyükten küçüğe doğru sıralandığında en uygun tedarikçi ölçütü, hizmet ölçütü, lojistik ölçütü, ürün ölçütü ve maliyet ölçütü veren alternatif bulunmuştur.

Çalışmada değerlendirilen 5 alternatif için yakınlık katsayıları en yüksek olan A_3 seçilmiştir. Sırasıyla A_2 , A_4 , A_5 ve A_1 dir. Chen'in 2000 yılında belirlemiş olduğu değerlendirme durum tablosuna göre çıkan sonuçlar [0,6-0,8] aralığında olduğu için alternatifler ile çalışma durumu kabul edilebilir olduğu gözlenmiştir.

BTOPSIS yöntemi perakende sektörü gibi çok sayıda dilsel değişkenliğinin bulunduğu durumlarda ve alternatiflerin bir grup olarak karar verilmesinde yalnızca bir sefer için değil, yeni mağazaların açılması veya yeni yatırım kararlarında tedarikçi seçiminde de kullanılabilen esnek bir yöntemdir.

6. KAYNAKÇA

Akdeniz, H.A. & Turgutlu, T. (2007). "Türkiye'de perakende sektöründe analitik hiyerarşik süreç yaklaşımıyla tedarikçi performans değerlendirmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi Sos. Bil. Ens. Dergisi, (C:IX, S:1-17)

Akman, G. & Alkan, A. (2006). Measurement of supplier performance at supply chain management by using Fuzzy AHP method: a study at automotive subcontractor industry. *Istanbul Commerce Univ J Sci*, 5, 3-46.

Alpay, H. (2006). "Perakendecilikte mağaza yer seçimi ve kocaeli'de örnek bir uygulama" Kocaeli Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 2006

Amindoust, A. Ahmed, S. Saghafinia, A. & Bahreininejad, A. (2012). Sustainable supplier selection: a ranking model based on fuzzy inference system. *Applied Soft Computing*. 12(6):1668-77.

Araz, C. & Ozkarahan I. (2007). Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multi-criteria sorting procedure. *International Journal of Production Economics*. 106(2):585-606.

Arslan, G. & Aydin, Ö. (2009). A new software development for fuzzy multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, 15(2), 197-212.

Bai, C. & Sarkis, J. (2011). Evaluating supplier development programs with grey based rough set methodologies, expert syst. Appl. 38(11), 13505-13517

Başkol, M. (2016). "Bir rekabet aracı olarak tedarik zinciri yönetimi: strateji ve yaklaşımlar". Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi 3 / 5, 13-27.

Büyükozkan, G. & Çifçi, G. (2012). A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. *Expert systems with applications*, 39(3), 2341-2354.

Chai J. James N.K. & Ngai, W.T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature, *Expert System with Applications* 40(2013) 3872-3885.

Chan, F. T. & Chan, H. K. (2010). An AHP model for selection of suppliers in the fast changing fashion market. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12), 1195-1207.

Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.

Chen, C. T. Lin, C. T. & Huang, S. F. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International journal of production economics*, 102(2), 289-301.

Chen, C.T. (2012). Performance measurement and evaluation for sustainable supply chains using rough set and data envelopment analysis. In: Boone, T. Jarayaman, V. Ganeshan, R.(eds.) Sustainable Supply Chains, pp. 223-241. Springer, Berlin

Chun Lin & Liang-Shan Eu, (2010). How supermarket chains in Taiwan select suppliers of fresh fruit and vegetables via direct purchasing, *The Service Industries Journal*, 31:8, 1237-1255, DOI: 10.1080/02642060090347568

Çebi, F. & Bayraktar, D., (2003). An integrated approach for supplier selection, *Logistics Information Management*, 16(6), 395-400

Dağdeviren, M. & Eraslan, E. (2008). Promethee sıralama yöntemi ile tedarikçi seçimi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. C:XXIII*, No:1, s. 69 -75

Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of purchasing*, 2(1), 5-17.

Ecer, F. (2006). Bulanık ortamlarda grup kararı vermeye yardımcı bir yöntem: fuzzy topsis ve bir uygulama, *İşletme Fakültesi Dergisi*, C:VII, No:2, s. 77 -96.

Esmer, Y.& Pabucçu, H. (2019). Stratejik kariyer planlama: bulanık mantık yaklaşımı. *İzmir İktisat Dergisi*, 34(1), 111-124.

Manish,G. & Proth, J.M. (2002). Supply Chain design and management:strategic and tactical perspectives, Academic Press:California,s.21

Hoyland P. (2018). The European Union's pursuit of strategic autonomy: Hedging through the dual-use of space Per Hoyland Allkopi NetPrint, Oslo Word count: 33 393

Stock, J. (1992). "International Journal of Physical Distribution & Logistics Management", *Marketing Intelligence & Planning*, Vol. 10 Issue: 7, pp.12-15,

Kazançoğlu, Y. & Erhan, A. D. A. (2010). Perakende sektöründe tedarikçi seçiminin bulanık ahp ile gerçekleştirilmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 9(1), 29-52.

Lin, C. T. Chen, C. B. & Ting, Y. C. (2011). An ERP model for supplier selection in electronics industry. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1760-1765.

Lin, P. C. & Wu, L. S. (2011). How supermarket chains in Taiwan select suppliers of fresh fruit and vegetables via direct purchasing. *The Service Industries Journal*, 31(8), 1237-1255.

Macik, Radoslaw, Macik, Dorota & Nalewajek, Monika, (2013). "Consumer preferences for retail format choice - case of polish consumers", *Management, Knowledge and Learning International Conference*, Hırvatistan.

Özcan, T. Çelebi, N. & Esnaf, Ş. (2008). Çok kriterli karar verme metodolojilerinin karşılaştırmalı analizi ve depo yeri seçimi problemine uygulanması. *VIII. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 256.

Pal, O. Gupta, A. K. & Garg, R. K. (2013). Supplier selection criteria and methods in supply chains: A review. *International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering*, 7(10), 1403-1409.

Rantanen , J. , Grant , D. B. & Piotrowicz , W. (2017). Investigating supply chain cooperation in finnish grocery retail ' Research Journal of the University of Gdańsk : Transport Economics and Logistics , vol 71 , pp. 19-34 . DOI: 10.5604/01.3001.0010.5721

Rezaei, J., Fahim, P. B., & Tavasszy, L. (2014). Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening method and fuzzy AHP. *Expert systems with applications*, 41(18), 8165-8179.

Seçme, N. Y., & Özdemir, A. İ. (2008). Bulanık analitik hiyerarşi yöntemi ile çok kriterli stratejik tedarikçi seçimi: Türkiye örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 22(2), 175-191.

PERAKENDE SEKTÖRÜNDE TEDARİKÇİ SEÇİMİ VE DENİZLİ DE BİR UYGULAMA

Sorkun M.F. (2018). Üreticileri tersine lojistik faaliyetlerine yönelten motivasyonlar hiyerarşisi Cilt 18 · Sayı 2 · Nisan 2018 SS. 243 / 259 Doi: 10.21121/eab.2018237353

Şen, Z. (2001). Bulanık (Fuzzy) mantık ve modelleme ilkeleri. *Bilge Kültür Sanat Yayınları, İstanbul.*

Türer, S., Ayvaz, B., Bayraktar, D., & Bolat, B. (2008). Tedarikçi değerlendirme süreci için yapılan sinir ağı yaklaşımı: gıda sektöründe bir uygulama. *Endüstri Mühendisliği Dergisi, 20(2)*, 31-40.

Verhoef, C. Peter, Kannan, K. P., & Inman, J. Jeffrey, (2015). “From multi-channel retailing to omni-channel retailing”, *Journal of Retailing*, 91 (2), 174-181.

Sabourin, V. & Ayande, A. (2004). Consortium strategy & innovation, school of management of university of quebec in Montreal. UQAM, ESG School of Management, 315 east St-Catherine Montreal Qc. Canada H3C 4P2.

Wang, Y. J., & Lee, H. S. (2007). Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making. *Computers & Mathematics with Applications*, 53(11), 1762-1772.

Yucel, A. & Güneri, A.F. (2011). A weighted additiv fuzzy programming approach for multi-criteria supplier selection. *Expert System with Applications*, 38(5), 823-833

Sektörel Bakış 2019 Perakende. (2020, 7 Şubat) Erişim adresi: <https://home.kpmg/tr/tr/home/gorusler/2019/02/sektorel-bakis-2019-perakende.html>

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mihrimah Özmen *

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü / Erciyes Üniversitesi, Türkiye

*mihrimah@erciyes.edu.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Seyahat ve Turizm (S&T), bol miktarda döviz kazancı ile bölgesel ekonomik kalkınmayı etkileyebilmekte ve gelişmekte olan ülkelere değerini yükseltmesi için olanaklar sunmaktadır. Son yıllarda, S&T sektörü ekonomik büyümenin önemli itici güçleri arasında yer almaktadır. S&T, devam eden büyümesi ve çeşitliliği ile dünyanın en büyük ve en hızlı büyüyen sektörlerinden biri haline gelmiştir. 2030 yılına kadar öngörülen 1,8 milyar uluslararası turist sayesinde sektör, istihdam olanakları yaratmada rol almaktadır. Araştırmalara göre, her 30 yeni turist için yeni bir iş fırsatı doğmaktadır ve bugün, S&T sektörü diğer sektörlerden neredeyse iki kat daha fazla kadın çalışan istihdam etmektedir. Ayrıca, S&T dünya hizmet ihracatının % 30'unu oluşturmaktadır ve birçok gelişmekte olan ülkede en büyük ihracat sektörüdür; ve sektör önemli miktarda istihdam yaratmaktadır. S&T sektörünün önemi nedeniyle, birçok ülke sektörlerinin küresel pazarda rekabet edebilirliğini artırmak için çaba sarf etmektedir. S&T Rekabet Edebilirlik Endeksi (STRE)' ye göre ülke sıralaması, bir ülke için küresel pazarda S&T sektörünün rekabet gücünü ölçmek için yararlı bir kaynaktır. Bu sıralama ilk olarak 2007 yılında S&T Rekabet Edebilirlik Raporu'nda Dünya Ekonomik Forumu tarafından yayınlanmıştır. STRE sıralamaları, sektörün gelecekteki hedefleri belirlemesine ve bu hedefler doğrultusunda politika ve eylemler oluşturmaya yardımcı olur. Ayrıca, sektörün trend analizi sayesinde; Endüstri, uluslararası organizasyonlar ve hükümet liderlerine küresel ve uzun vadeli bir bakış açısı sağlar.

S&T rekabetçiliğinin ülkeye katkısı göz önüne alındığında, son yıllarda birçok çalışma yürütülmektedir. Diğer araştırmacılara göre, S&T rekabetçiliği bir ülke sakinlerinin ekonomik refahı ile ilişkilidir [1-2]. Bu nedenle, son çalışmalar giderek daha fazla S&T rekabetçiliğine odaklanmaktadır [3-4]. Ozmen ve Aydoğan Kaba SWARA-TODIM yöntemleri ile ülkeler değerlendirilmiştir. Zhang ve diğ. [5], Çin'in Yangtze Nehri Deltası'nın S&T rekabetini değerlendirmek için TOPSIS ve bilgi entropisini uygulamışlardır. Ayrıca, Kozak ve Rimmington [6], uluslararası S&T rekabetçiliğinin hem nicel hem de nitel rekabet edebilirlik kriterlerini elde etmek için bir yaklaşım uyguladılar. Dahası, Cracolici ve Nijkamp [7]. Wu [8] çalışmasında, sıralama elde etmek için Borda sayım yöntemini kullanmanın yanı sıra, sıralama güvenilirliğini artırmak için DEA, GST ve YSA dahil objektif ağırlıklandırma yöntemlerini de uygulamıştır. Peng ve Tzeng [9], DEMATEL tabanlı ANP' den oluşan yeni bir ÇKKV yaklaşımı uygulayarak S&T rekabet gücünü geliştirmek için stratejiler üretmektedir. Peng ve Tzeng [10], bulanık DEMATEL temelli ANP'den oluşan başka bir ÇKKV yaklaşımı uygulayarak S&T rekabet gücünü geliştirme stratejileri oluşturmuşlardır. Bununla birlikte, az sayıda çalışma, tüm STRE kriterlerine sahip tüm ülkeleri araştırmış ve sıralamıştır.

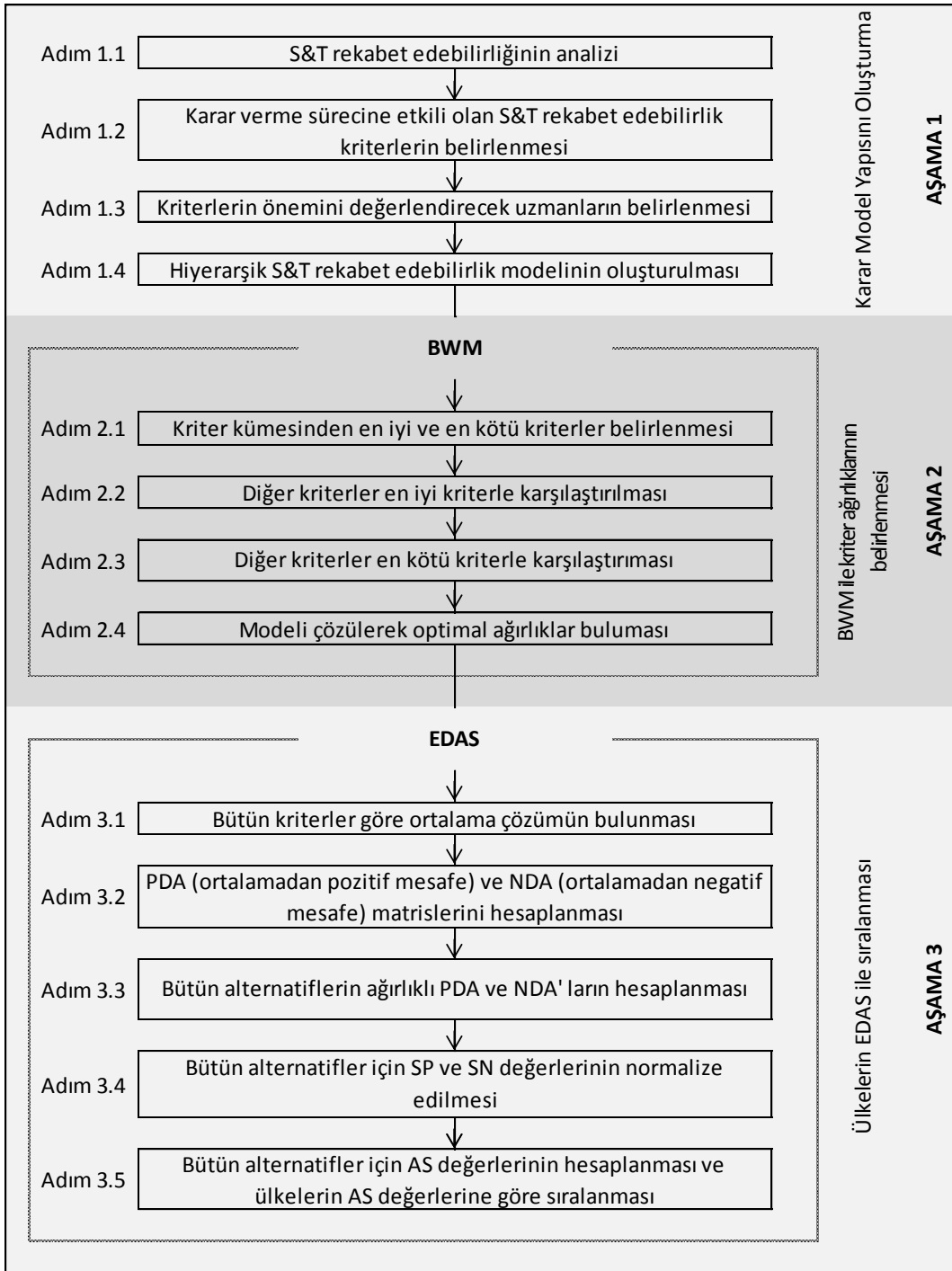
STRE, S&T sektörünün küresel rekabetçiliğinin nasıl güçlendirileceği konusunu değerlendiren ve çok paydaşlı diyalog için küresel bir platform sağlayan bir değerlendirme aracıdır. STRE, uluslararası ekonomik kalkınmaya etkili bir şekilde katkıda bulunan güçlü ve sürdürülebilir bir S&T sektörüne hizmet etmektedir. STRE, birçok karar verme probleminde de olduğu gibi birçok kriter

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

içermektedir. STRE hesaplanırken önemi birbirinden farklı bu kriterlerin ağırlıkları dikkate alınmamaktadır ancak farklı kriter ağırlıkları sıralama sonuçlarını değiştirir. Bu durumu göz önünde bulundurarak ülkelerin S&T rekabet edebilirliği, BWM ve EDAS yöntemlerinden oluşan ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemi ile değerlendirilmiştir. BWM-EDAS yöntemi uygulanarak, politika yapıcılara ve paydaşlara STRE' dan daha gerçekçi ve bilinçli kararlar sunulabilir

STRE, bir ülkenin kalkınmasını ve rekabet gücünü etkileyen birçok kriteri ölçmek için kapsamlı bir stratejik yaklaşım sağlar. Dünya çapındaki ülkelerin S&T sektörünün kapsamlı değerlendirmelerine katkıda bulunarak, karşılaştırmalar sektörün rekabet gücü için yararlı olabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, dört ana kriter ve 14 alt kriter içerir. Bu dört ana kriter şunlardır: A. Kolaylaştırıcı ortam, B. T&T politika ve koşullar, C. Altyapı ve D. Doğal ve kültürel kaynaklar. Ayrıca ülkelerin STRE sıralaması, bu dört ana kriterin değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmektedir. Yani, STRE sıralaması bu dört ana kriteri eşit derecede önemde kabul etmektedir. Ancak, gerçek dünyada kriterler aynı öneme sahip değildir. Bu nedenle, daha anlamlı sıralama elde etmek için ağırlıklandırma yöntemleri uygulanmalıdır. Bu çalışmada, ülkelerin S&T rekabet edebilirliğinin değerlendirilmesinde, ÇKKV yaklaşımı BWM-EDAS uygulanmıştır.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 1. S&T rekabet edebilirliği ÇKKV değerlendirme modeli BWM-EDAS

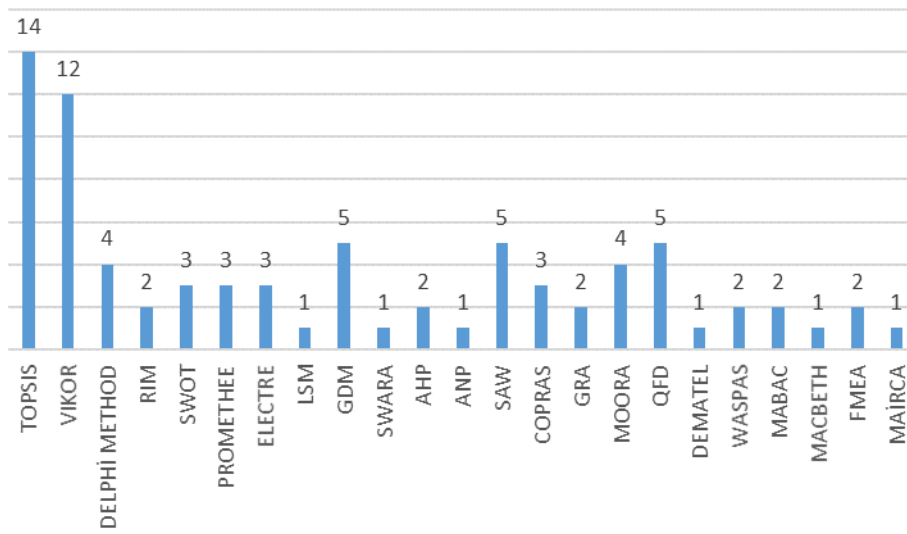
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Seyahat ve Turizm Rekabet Edebilirliği 2017 Raporu veri kümesinden BWM-EDAS yöntemiyle ülkeleri S&T rekabet edebilirliği açısından değerlendirilmiştir [11]. S&T rekabet edebilirliğinin değerlendirilmesi için önerilen ÇKKV modeli Şekil 1'de özetlenmiştir.

2.1. BWM

BWM yöntemi 2015 yılında Rezaei tarafından geliştirilmiştir [12]. Bu yöntem sayesinde, daha az ikili karşılaştırma yapılarak kriter ağırlıkları elde edilebilmektedir. BWM sadece diğer kriterleri en iyi ve en kötü kriterlerle karşılaştırır. Orijinal BWM, ilk olarak doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak önerilmişti ancak 2016 yılında [13], daha az ikili karşılaştırmayla daha kolay benzersiz sonuçlar elde edebilen BWM için doğrusal model de önerilmiştir. Doğrusal BWM yöntemi de tutarlı bir şekilde güvenilir sonuçlar vermektedir.

BWM yönteminin birçok ÇKKV yöntemi ile uygulamaları mevcuttur. Şekil 2' de uygulama sayılarının da yer aldığı bu yöntemler: TOPSIS, VIKOR, DELPHI, PROMETHEE, ELECTRE, TESTERE, COPRAS, MOORA, QFD, vb. [14]. BWM-EDAS yöntemi ise lojistik merkez seçimi probleminde uygulanmıştır [15].



Şekil 2. BWM' nin birlikte uygulandığı en popüler ÇKKV modelleri [15]

BWM, oldukça karmaşık sistemleri yapılandırmak için uygun bir metodolojidir, böylece karar vericiler ve politika yapımcılar ilgili sistemi daha iyi anlayabilmektedir. Ayrıca BWM birçok gerçek hayat problemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır: Havayolu endüstrisi, Enerji, Yatırım, Yer seçimi, Üretim, Performans değerlendirme, Tedarikçi seçimi, Tedarik zinciri, Teknoloji, Ulaşım, Su yönetimi, vb. [14].

Doğrusal BWM yönteminde kriter ağırlıklarını elde etmek için beş adım uygulanır [12,13,16]. Bunlar aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Kriter kümesi belirlenir $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

Adım 2: Kriter kümesinden en iyi ve en kötü kriterler belirlenir.

Adım 3: Diğer kriterler en iyi kriterle karşılaştırılır. Karşılaştırmalarda, önem düzeyini belirtmek için 1 ile 9 arasında bir sayı atanır. (1 ile 9 ölçüm skalasının tanımı: 1 = eşit önemde, 3 = biraz daha önemli (az üstünlük), 5 = oldukça önemli (fazla üstünlük), 7 = çok önemli (çok üstünlük), 9 = son derece önemli (kesin üstünlük), 2, 4, 6 ve 8 = ara değerler).

En iyi ve diğerleri vektörü:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

Denklemden a_{Bj} , kriter j üzerindeki en iyi kriter B 'nin önemini belirtir. Ayrıca $a_{BB} = 1$ ' dir.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Adım 4: Diğer kriterler en kötü kriterle karşılaştırılır. Karşılaştırmalarda 1 ila 9 arasında bir sayı atanır.

En kötü ve diğerleri vektörü:

$$A_w = (a_{1w}, a_{2w}, \dots, a_{nw})^T \quad (2)$$

Denklemden a_{jw} , en kötü kriter w üzerindeki kriter j 'nin önemini belirtir. Ayrıca $a_{ww} = 1$ 'dir.

Adım 5: Optimal ağırlıklar bulunur.

Aşağıdaki modeli çözerek optimal ağırlıklar $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ ve ξ^L elde edilir.

$$\min \xi^L$$

s.t.

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

$$|w_j - a_{jw}w_w| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

$$\sum_j w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j$$

Bu model için, ξ^L karşılaştırmaların tutarlılığının doğrudan bir göstergesi olarak düşünülebilir. Sıfıra yakın ξ^L değerleri yüksek bir tutarlılık seviyesini gösterir.

2.2. EDAS

EDAS literatürde çok sayıda çelişkili kriterle başa çıkabilen bir yöntem olarak literatüre kazandırılmıştır. Sonuçlarının TOPSIS, VIKOR ve benzeri diğer yöntemlerle son derece tutarlı olduğunu kanıtlanmıştır [17]. VIKOR ve TOPSIS GİBİ Geleneksel ÇKKV yöntemleri ideal ve nadir çözümlere göre en iyi alternatifi belirler. Bu yöntemlerin aksine, EDAS, alternatifleri değerlendirmek için ortalamaya olan pozitif ve negatif mesafeyi ele alır. Dolayısıyla ideal ve nadir çözümler hesaplanmadığı için EDAS nispeten hesaplama zorluğu açısından daha kolay bir yaklaşımdır [18].

EDAS yönteminin avantajları:

- EDAS yönteminin uygulaması kolaydır
- EDAS hem öznel hem de nesnel kriterleri olan karar verme problemlerini değerlendirebilir.
- EDAS mantıklı ve anlaşılır bir yöntemdir.
- EDAS yönteminin hesaplama süreçleri basittir.

EDAS yöntemi birçok alanda uygulanmıştır. Bu çalışmalar arasında; bina inşaatı, konveyör seçim problemi, otomatik araç seçim problemi, çelik halat analizi ve teşhisi, elektrikli araçlar için kamu altyapısı, taşeron değerlendirme, tesis yeri, inşaat ekipmanı değerlendirme ve personel seçimi yer almaktadır [19]. EDAS, tedarikçi seçimi [20,21], katı atık bertaraf yeri seçimi [22] ve yenileme projeleri için kültürel miras yapılarının önceliklendirilmesi [23] gibi alanlarda da uygulanmıştır.

EDAS yöntemi sekiz adım ile gerçekleştirilmektedir [24].

Adım 1: Alternatiflerin bir karşılaştırma matrisini (X) oluşturun. X_{ij} , j . ölçüt üzerindeki i . alternatifin performans değerini ifade eder.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 2: Bütün kriterler göre ortalama çözümün bulunması

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} \quad (4)$$

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^m X_{ij}}{m} \quad (5)$$

Adım 3: PDA (ortalamadan pozitif mesafe) ve NDA (ortalamadan negatif mesafe) matrislerinin hesaplanması

$$PDA = [PDA_{ij}]_{m \times n} \quad (6)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

PDA_{ij} ve NDA_{ij} , j . kriter açısından ortalama çözümlerin i . alternatifin pozitif ve negatif mesafesini gösterir.

Eğer j . kriter fayda kriteri ise,

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (8)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (9)$$

Eğer j . kriter maliyet kriteri ise,

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (10)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (11)$$

Adım 4: Bütün alternatiflerin ağırlıklı PDA ve NDA değerlerinin hesaplanması.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n w_j \times PDA_{ij} \quad (12)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n w_j \times NDA_{ij} \quad (13)$$

w_j j . kriterin ağırlığını göstermektedir.

Adım 5: Bütün alternatifler için SP ve SN değerlerinin normalize edilmesi

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (14)$$

$$NSN_i = \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (15)$$

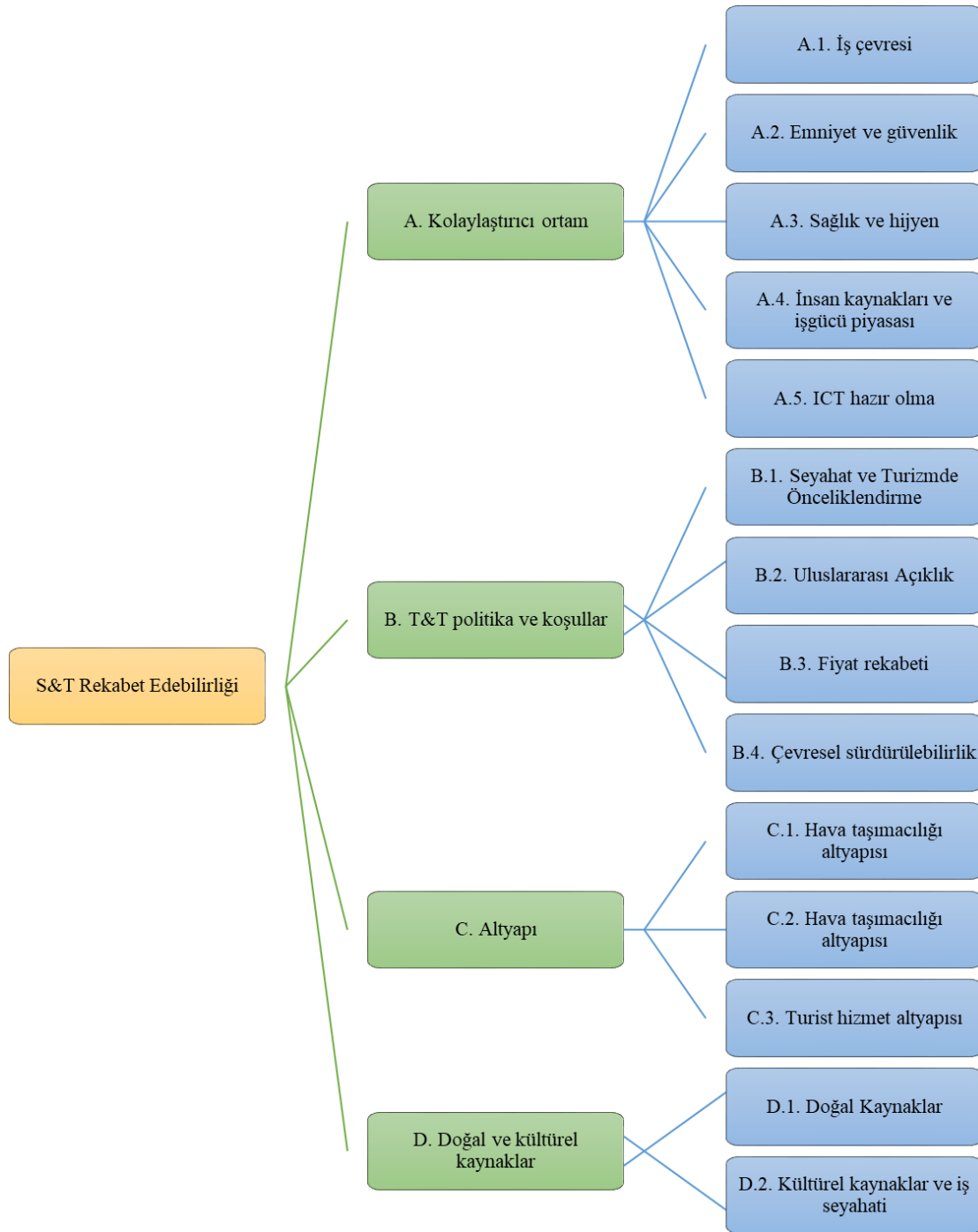
Adım 6: Bütün alternatifler için AS (değerlendirme puanı) değerlerinin hesaplanması,

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (16)$$

$$0 \leq AS_i \leq 1.$$

Adım 7: Bütün alternatiflerin AS' nin azalan değerlerine göre sıralanması

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 3. Ülkelerin S&T rekabet edebilirliği hiyerarşik yapısı [11]

3. BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN S&T REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, “Seyahat ve Turizm Rekabet Raporu 2017” verilerinden BWM-EDAS yöntemi uygulanarak ülkeler S&T rekabet edebilirliği açısından sıralanmıştır [11]. 136 ülke 4 ana ve 14 alt kritere göre değerlendirilmiştir. Kriterlerin hiyerarşik yapısı Şekil 3’de verilmiştir.

3.1. BWM Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Tüm kriterlerin S&T rekabet edebilirliği üzerinde kritik bir etkisi vardır. İlk olarak değerlendirmede kullanılan kriter tanımları verilmiştir. BWM ile S&T rekabet edebilirliği için kriter ağırlıkları oluşturmak için S&T sektörü uzmanı ve akademisyenlerin görüşleri alınmıştır. Uzmanlar tarafından yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. İlk olarak her hiyerarşik seviye için en iyi ve en kötü kriterler belirlenmiştir. Ana kriterler arasından en önemli kriter B. S&T politika ve koşullar en az önemli kriter ise A. Kolaylaştırıcı ortam olarak belirlenmiştir. Buna göre Tablo 1’de verilen karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tablo 1. Ana kriterlerin karşılaştırılması

	A	B	C	D	Tutarlılık
En iyi kriter: B	8	1	2	5	0.0589
En kötü kriter: A	1	8	6	3	

A. Kolaylaştırıcı ortam ana kriterine ait alt kriterler arasından en önemli kriter A.2 Emniyet ve güvenlik en az önemli kriter ise A.1 İş çevresi ortam olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. A. Kolaylaştırıcı ortam ana kriterlerine ait alt kriterlerin karşılaştırması

	A1	A2	A3	A4	A5	Tutarlılık
En iyi kriter: A2	9	1	3	6	4	0.0608
En kötü kriter: A1	1	9	5	2	4	

B. S&T politika ve koşullar ana kriterine ait alt kriterler arasından en önemli kriter B.1 Seyahat ve Turizmde Önceliklendirme en az önemli kriter ise B.4 Çevresel sürdürülebilirlik olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. B. S&T politika ve koşullar ana kriterlerine ait alt kriterlerin karşılaştırması

	B1	B2	B3	B4	Tutarlılık
En iyi kriter: B1	1	6	3	9	0.071
En kötü kriter: B4	9	3	5	1	

C. Altyapı ana kriterine ait alt kriterler arasından en önemli kriter C.1 Hava taşımacılığı altyapısı en az önemli kriter ise C.3 Turist hizmet altyapısı olarak belirlenmiştir.

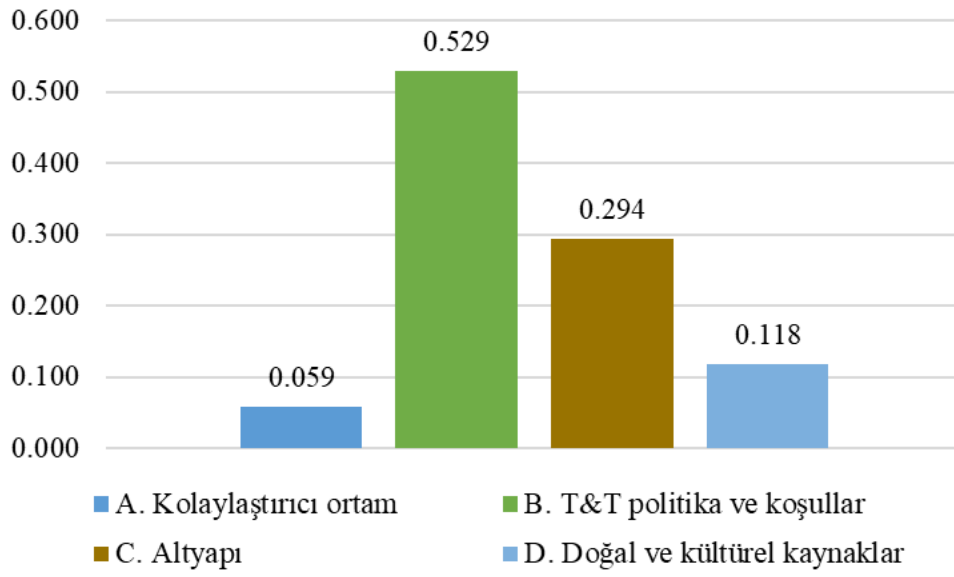
Tablo 4. C. Altyapı ana kriterlerine ait alt kriterlerin karşılaştırması

	C1	C2	C3	Tutarlılık
En iyi kriter: C1	1	4	7	0.054
En kötü kriter: C3	6	2	1	

Ayrıca, Tablo 1-4’ ün son sütununda, ikili karşılaştırmanın tutarlılık değerleri yer almaktadır. Karşılaştırmaların tutarlılık değerleri 0.10’dan daha küçüktür ve bu durum karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir.

Yapılan karşılaştırmalardan elde edilen ağırlıklar Tablo 5 ve Şekil 4-5’ te verilmiştir.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

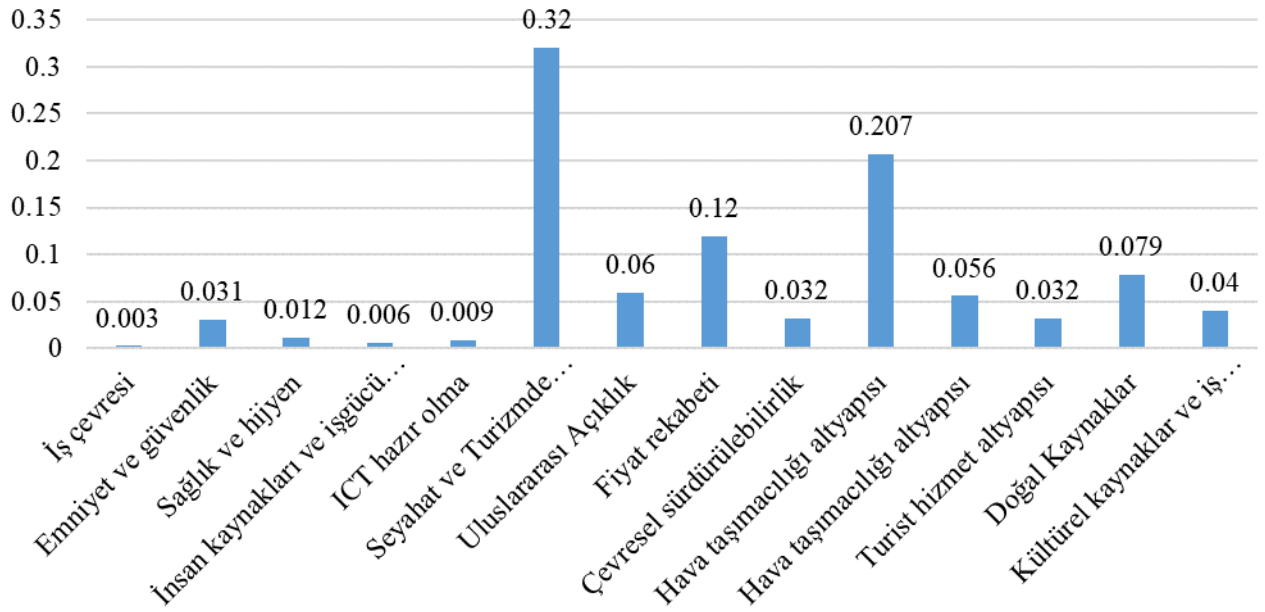


Şekil 4. Ana kriterlere ait ağırlıklar

Tablo 5. Kriter tanımları ve ağırlıkları

Ana Kriterler	Ağırlık	Alt Kriterler	Tanımı	Ağırlık	Toplam Ağırlık
A. Kolaylaştırıcı ortam	0.059	A.1	İş çevresi	0.051	0.003
		A.2	Emniyet ve güvenlik	0.516	0.030
		A.3	Sağlık ve hijyen	0.192	0.011
		A.4	İnsan kaynakları ve işgücü piyasası	0.096	0.006
		A.5	ICT hazır olma	0.144	0.008
B. S&T politika ve koşullar	0.529	B.1	Seyahat ve Turizmde Önceliklendirme	0.604	0.320
		B.2	Uluslararası Açıklık	0.112	0.060
		B.3	Fiyat rekabeti	0.225	0.119
		B.4	Çevresel sürdürülebilirlik	0.059	0.031
C. Altyapı	0.294	C.1	Hava taşımacılığı altyapısı	0.703	0.207
		C.2	Hava taşımacılığı altyapısı	0.189	0.056
		C.3	Turist hizmet altyapısı	0.108	0.032
D. Doğal ve kültürel kaynaklar	0.118	D.1	Doğal Kaynaklar	0.667	0.078
		D.2	Kültürel kaynaklar ve iş seyahati	0.333	0.039

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 5. Alt kriterlere ait ağırlıklar

Kriterlere ait ağırlıklar incelendiğinde en yüksek ağırlığa sahip ana kriter 0.529 ile B. T&T politika ve koşullar, en düşük ağırlığa sahip ana kriter 0.059 ile A. Kolaylaştırıcı ortam olarak belirlenmiştir. Alt kriterler arasından en yüksek ağırlığa sahip alt kriter 0.32 ile B.1 Seyahat ve Turizmde Önceliklendirme, en düşük ağırlığa sahip alt kriter 0.03 ile A.1 İş çevresi olarak belirlenmiştir.

3.2. EDAS Yöntemi ile Ülkelerin Karşılaştırılması

BWM ile kriterlerin ağırlıkları elde edildikten sonra, Tablo 6' da verilen "Seyahat ve Turizm Rekabet Raporu 2017" STRE verilerine göre ülkeler EDAS yöntemi ile değerlendirilmiştir [11].

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 6. Karar matrisi

ÜLKE	KRİTER DEĞERLERİ													
	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5.	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	D.1	D.2
Arnavutluk	4.07	5.71	5.22	4.90	4.14	4.56	2.40	4.70	4.11	2.00	3.06	3.91	2.19	1.14
Cezayir	4.03	5.28	4.92	4.02	3.74	2.84	1.51	6.03	3.73	2.08	2.53	2.06	2.16	2.10
Arjantin	3.14	4.96	6.38	4.58	4.65	4.61	2.77	4.06	3.44	2.72	2.60	4.53	4.36	4.54
Ermenistan	4.87	5.86	5.91	4.84	4.34	4.58	2.60	4.79	3.77	2.20	2.86	3.94	2.60	1.40
Avustralya	5.05	6.10	6.14	5.13	5.97	5.06	4.77	3.82	4.49	5.69	3.57	6.06	5.21	4.95
Avusturya	4.96	6.28	6.71	5.52	5.84	5.33	4.01	3.86	5.63	3.89	5.25	6.67	4.11	3.06
Azerbeycan	4.57	5.85	6.09	5.04	4.97	4.80	2.95	5.38	4.05	2.43	3.71	3.33	2.38	1.73
Bahreyn	5.50	5.70	5.17	4.66	6.01	4.32	2.87	5.53	3.83	3.46	5.21	4.93	1.67	1.32
Bangladeş	4.10	3.69	4.34	3.80	3.08	3.18	2.47	4.66	3.38	1.93	3.11	1.93	2.39	1.64
Barbados	4.42	5.60	6.05	4.66	5.17	5.80	2.85	3.05	4.67	3.80	5.19	4.90	2.26	1.18
Belçika	4.93	5.90	6.71	5.35	5.72	4.47	4.15	4.38	4.57	3.74	5.70	5.29	2.20	4.09
Benin	4.29	5.24	2.90	4.50	2.71	3.14	1.54	4.91	3.88	1.67	2.34	2.44	2.67	1.17
Butan	4.72	6.09	4.62	4.34	3.93	5.00	2.93	6.00	4.65	2.71	2.54	2.71	3.52	1.25
Bolivya	3.00	5.01	4.43	4.04	3.75	3.62	2.78	4.34	4.25	2.23	2.18	3.28	3.96	2.03
Bosna Hersek	3.55	5.37	5.66	4.17	4.29	3.68	2.39	4.33	3.89	1.76	2.48	3.89	1.81	1.37
Botsvana	5.07	5.34	3.51	4.55	4.06	4.58	2.16	5.74	4.53	2.23	2.84	3.55	3.52	1.35
Brezilya	3.49	4.50	5.32	4.27	4.62	3.87	2.59	5.25	4.13	3.68	2.36	4.88	6.13	5.75
Bulgaristan	4.50	5.14	6.63	4.73	5.03	4.27	3.89	5.31	4.97	2.37	3.11	5.80	3.82	2.12
Burundi	3.86	4.23	3.80	3.86	1.57	2.51	1.79	4.72	4.10	1.58	2.34	1.84	2.04	1.15
Kamboçya	3.65	5.15	4.02	4.06	3.64	5.10	3.49	5.10	3.27	2.14	2.44	2.93	3.20	1.63
Kamerun	4.01	4.25	3.14	4.35	2.67	2.76	1.80	4.99	4.11	1.63	2.25	2.44	3.29	1.30
Kanada	5.25	6.10	5.59	5.47	5.59	4.88	3.32	4.53	4.74	6.76	3.96	5.97	4.57	4.14
Yeşil Burun Adaları	4.43	5.19	4.67	4.53	4.03	4.62	3.15	5.17	4.40	3.53	3.07	4.60	2.09	1.05
Çad	2.93	3.74	2.89	3.09	1.97	3.06	1.66	4.88	4.20	1.53	2.00	2.00	2.73	1.03
Şili	4.98	5.72	5.19	4.76	4.88	4.57	4.65	5.28	4.11	2.74	3.33	4.45	3.30	2.67
Çin	4.24	4.99	5.42	5.19	4.61	4.80	3.00	5.30	3.23	4.31	3.95	3.23	5.25	6.94
Kolombiya	4.02	2.59	4.99	4.62	4.37	4.13	4.64	4.38	4.17	2.83	2.32	3.69	4.47	3.37

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 6. Karar matrisi (devamı)

ÜLKE	KRİTER DEĞERLERİ													
	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5.	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	D.1	D.2
Kongo	4.08	4.04	2.77	3.88	1.59	1.89	1.51	3.84	3.97	1.61	1.79	1.91	4.06	1.36
Kosta Rika	4.50	5.43	5.01	4.89	5.17	5.22	4.23	4.34	4.59	3.18	2.64	5.33	5.43	1.75
Fildişi Sahili	4.32	4.97	2.56	3.74	3.54	3.53	2.62	4.35	4.28	2.18	3.20	2.95	3.45	1.26
Hırvatistan	4.01	6.09	6.38	4.39	5.05	4.50	4.16	4.45	4.73	3.05	3.89	6.26	4.50	2.77
Kıbrıs	4.59	5.82	5.81	4.92	4.77	5.71	3.77	4.27	4.05	3.05	3.67	5.63	2.90	1.78
Çek Cumhuriyeti	4.46	5.92	6.69	5.00	5.60	4.21	4.17	4.90	4.87	3.10	4.94	5.10	2.47	2.41
Danimarka	5.48	6.05	6.13	5.66	6.41	4.44	4.36	3.75	5.17	3.49	5.44	4.77	3.27	2.28
Dominik Cumhuriyeti	4.16	4.50	4.93	4.12	3.69	5.84	3.29	4.43	3.65	2.77	3.45	4.60	3.16	1.45
Ekvador	3.90	5.20	5.06	4.25	3.91	4.69	3.86	5.10	3.99	2.46	3.60	3.94	4.85	2.01
Mısır	4.34	3.29	5.40	4.15	3.88	4.98	2.49	6.18	4.13	2.87	2.97	3.22	2.49	3.31
El Salvador	4.02	3.02	4.94	4.25	3.66	4.32	4.51	4.85	4.08	2.07	2.95	3.28	2.35	1.48
Estonya	5.23	6.26	6.27	5.20	6.10	5.45	3.67	5.07	4.90	3.01	4.45	5.46	2.45	1.59
Etiyopya	3.96	4.90	4.47	3.67	2.60	3.61	2.59	4.92	4.25	1.97	2.80	2.17	2.99	1.66
Finlandiya	5.65	6.65	6.29	5.55	6.19	4.59	4.12	4.26	5.45	3.99	4.64	4.68	2.88	2.09
Fransa	4.74	5.43	6.52	5.14	5.86	5.14	4.24	4.12	4.83	4.90	5.65	5.70	4.77	6.75
Gabon	4.01	5.29	4.35	3.75	3.80	2.62	2.34	5.48	4.64	2.12	2.22	2.49	2.74	1.18
Gambiya	4.25	5.63	3.58	3.98	3.26	4.84	2.06	5.34	4.04	1.85	2.96	2.79	2.34	1.16
Gürcistan	5.26	6.01	6.10	4.78	4.45	4.90	3.13	4.90	4.42	2.20	3.28	4.03	2.39	1.56
Almanya	5.34	5.65	6.86	5.55	5.85	4.76	4.26	4.17	5.19	4.92	5.76	6.00	3.98	6.28
Gana	4.65	5.49	2.99	4.70	3.62	3.50	1.92	4.22	4.06	2.02	2.66	2.42	2.70	1.47
Yunanistan	4.11	5.63	6.57	4.80	4.92	5.47	4.11	4.66	4.48	4.27	3.75	5.70	4.06	3.08
Guatemala	4.45	3.74	4.58	4.14	3.80	4.43	3.94	5.64	3.76	1.85	2.68	3.74	3.72	1.65
Honduras	4.17	3.45	4.55	4.30	3.38	4.96	4.16	4.69	4.33	2.17	2.97	3.68	3.48	1.52
Hong Kong	6.16	6.47	6.56	5.43	6.47	5.77	3.89	4.23	4.30	5.52	6.40	4.39	3.53	2.98
Macaristan	4.17	5.72	6.63	4.66	4.88	4.90	4.17	4.66	4.71	3.00	4.45	4.44	2.61	2.27
İzlanda	5.33	6.57	6.07	5.76	6.11	6.03	4.40	3.58	4.85	4.69	3.97	5.82	3.50	1.47
Hindistan	4.26	4.12	4.36	4.37	3.21	3.92	3.70	5.85	3.08	3.92	4.46	2.70	4.39	5.28
Endonezya	4.54	5.06	4.30	4.64	3.81	5.58	4.27	6.00	3.25	3.77	3.20	3.12	4.75	3.28
İran İslam Cumhuriyeti	4.34	5.17	4.72	4.13	3.79	3.55	2.38	6.66	3.61	2.20	3.10	2.53	2.45	2.78
İrlanda	5.51	6.11	5.71	5.45	5.65	5.41	4.51	4.03	4.70	4.16	4.70	5.76	2.84	2.91
İsrail	5.01	4.62	6.06	5.24	5.47	4.57	2.54	3.13	3.93	3.23	4.21	5.40	2.55	2.00
İtalya	3.87	5.41	6.18	4.61	5.37	4.54	4.13	3.88	4.49	4.36	4.67	5.96	4.78	6.46
Jamaika	4.77	3.98	4.68	4.72	4.22	5.90	4.04	3.97	3.57	2.37	4.39	4.61	3.05	1.39
Japonya	5.31	6.07	6.43	5.25	6.14	5.36	4.38	4.61	4.38	4.60	5.40	5.33	4.31	6.53
Ürdün	4.82	5.78	5.54	4.52	5.09	5.28	3.29	4.78	4.04	2.61	3.04	4.14	2.26	1.28
Kazakistan	4.93	5.54	6.69	4.82	4.91	4.27	2.27	5.90	3.83	2.57	2.80	3.11	2.55	1.64
Kenya	4.43	3.45	3.17	4.49	3.43	5.31	3.01	4.83	4.68	2.53	3.13	3.18	4.73	1.63
Kore Cumhuriyeti	4.75	5.82	6.35	4.89	6.18	4.64	4.28	4.66	4.17	4.27	4.98	4.60	2.29	4.95
Kuveyt	4.56	5.73	5.43	4.30	5.48	3.30	1.90	5.26	3.07	2.50	3.46	3.84	1.95	1.18
Kırgız Cumhuriyeti	4.40	4.96	5.76	4.37	3.59	3.64	2.30	5.45	3.72	1.87	2.05	2.20	2.42	1.56
Lao PDR	4.72	5.44	4.34	4.63	3.14	4.75	3.00	5.72	3.83	2.13	2.39	3.47	2.98	1.35
Letonya	4.56	5.76	6.44	5.01	5.31	4.47	3.99	5.25	4.88	3.05	4.05	4.64	2.38	1.41
Lübnan	4.21	3.57	5.91	3.81	4.29	5.05	2.50	5.47	3.70	2.37	2.92	4.29	2.09	1.43
Lesotho	4.24	5.41	2.94	3.62	3.21	4.67	1.66	4.99	4.71	1.30	1.92	2.49	2.09	1.02
Litvanya	4.63	5.73	6.81	5.02	5.46	4.27	4.01	5.37	4.45	2.40	4.39	4.42	2.23	1.50
Lüksemburg	5.80	6.32	6.27	5.35	6.16	4.84	4.27	4.55	5.48	3.58	5.53	5.91	2.65	1.74
Makedonya	4.82	5.57	5.99	4.42	4.63	4.34	2.64	5.20	3.74	2.18	3.30	3.99	2.14	1.35

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 6. Karar matrisi (devamı)

ÜLKE	KRİTER DEĞERLERİ													
	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5.	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	D.1	D.2
Madagaskar	3.62	5.02	3.33	3.76	2.07	4.35	2.97	5.03	3.60	1.84	2.00	2.69	3.05	1.40
Malawi	4.17	5.40	2.97	4.23	2.45	3.40	2.83	4.58	4.22	1.43	2.06	2.22	2.91	1.34
Malezya	5.41	5.75	5.16	5.22	5.23	4.74	4.08	6.06	3.53	4.55	4.35	4.66	4.14	2.88
Mali	4.08	3.59	2.56	3.11	2.39	3.75	1.59	4.99	4.32	1.70	2.27	2.58	2.53	1.75
Malta	4.75	5.92	6.35	4.76	5.43	6.18	3.96	4.44	4.09	3.86	4.53	5.50	3.08	1.49
Moritanya	3.38	4.21	3.69	2.56	2.16	3.17	2.94	4.83	3.69	1.59	1.98	2.44	2.31	1.08
Mauritius	5.23	5.88	5.34	4.80	4.54	5.96	3.48	4.13	4.33	3.00	4.55	4.93	2.44	1.34
Meksika	4.18	4.16	5.26	4.57	4.34	5.09	3.73	4.92	3.62	3.68	3.20	4.68	5.63	5.26
Moldova	3.81	5.42	6.13	4.31	4.30	3.44	2.13	5.38	4.06	1.98	2.55	2.80	1.60	1.16
Moğolistan	4.41	5.65	5.82	4.45	4.02	3.98	1.88	5.72	3.41	2.17	2.13	2.69	2.75	1.83
Karadağ	4.36	5.37	5.80	4.46	4.83	4.64	2.44	4.82	4.33	3.01	3.23	5.36	2.58	1.11
Fas	4.69	6.14	4.57	3.92	4.27	5.03	2.66	5.19	3.72	2.77	3.38	3.83	3.62	2.50
Mozambik	4.23	4.57	1.83	3.62	2.64	3.97	3.05	4.63	4.15	1.77	2.12	2.83	2.93	1.25
Namibya	4.90	5.24	3.52	4.13	3.88	4.64	2.66	5.38	3.91	2.96	3.20	3.96	3.84	1.17
Nepal	4.07	4.85	5.01	4.18	2.61	4.79	2.80	5.58	3.43	2.03	1.91	2.35	4.21	1.28
Hollanda	5.50	6.14	6.23	5.52	6.09	4.71	4.27	4.13	5.10	4.95	6.13	4.86	2.25	3.36
Yeni Zelanda	5.65	6.31	5.72	5.52	5.99	5.61	4.52	4.38	4.74	4.70	3.68	5.69	4.48	2.28
Nikaragua	3.49	5.44	4.60	4.22	3.32	4.61	4.29	5.05	4.03	1.95	2.70	3.51	3.31	1.36
Nijerya	4.31	3.10	2.68	3.63	3.20	3.21	1.89	4.88	3.87	2.01	2.07	2.72	2.40	1.91
Norveç	5.56	6.41	6.31	5.63	6.27	5.21	4.05	3.69	5.55	5.28	3.48	5.43	4.10	2.22
Umman	5.11	6.49	5.43	4.15	5.05	4.43	2.18	5.48	3.71	2.99	3.88	4.10	2.62	1.94
Pakistan	3.94	3.10	4.53	3.11	2.55	3.40	2.25	5.43	3.11	2.11	3.03	2.31	2.24	1.94
Panama	4.94	5.31	5.14	4.39	4.53	5.12	4.44	5.18	4.65	4.69	4.18	4.88	4.61	1.74
Paraguay	4.29	4.69	5.02	4.11	3.65	4.90	2.50	4.96	3.81	1.57	2.10	3.34	2.26	1.44
Peru	4.31	4.49	4.80	4.65	4.20	4.58	4.30	3.83	4.10	2.52	2.43	4.67	5.27	3.28
Filipinler	4.32	3.56	4.79	4.78	3.96	4.76	3.37	5.51	3.61	2.73	2.47	3.43	3.95	1.92
Polonya	4.47	5.70	6.25	4.87	5.06	4.15	4.10	5.50	4.58	2.61	4.27	4.19	2.98	2.84
Portekiz	4.63	6.32	6.25	5.16	5.22	5.53	4.23	4.83	4.35	3.94	4.19	6.37	3.88	3.89
Katar	5.84	6.33	5.96	5.18	5.82	4.53	2.04	5.75	4.15	4.29	4.65	5.04	1.81	1.58
Romanya	4.36	5.78	6.14	4.45	4.70	3.81	3.93	4.68	4.41	2.37	2.80	4.37	2.99	2.27
Rusya Federasyonu	4.09	4.31	6.70	4.83	4.98	4.21	2.21	5.75	4.11	4.51	3.05	4.46	3.85	3.23
Ruanda	5.09	6.39	3.79	4.67	3.32	4.30	2.91	4.80	4.80	1.92	3.46	2.35	2.75	1.29
Suudi Arabistan	5.20	5.51	5.58	4.56	5.60	4.42	1.61	5.62	3.48	3.73	3.28	4.65	2.46	2.19
Senegal	4.24	5.45	3.63	3.59	3.22	3.31	2.47	3.75	4.28	2.04	2.90	3.11	3.38	1.43
Sırbistan	4.02	5.41	6.04	4.43	4.80	3.60	2.41	4.82	4.18	2.35	2.77	3.92	2.01	1.65
Sierra Leone	4.16	5.14	2.34	4.16	2.28	3.62	1.84	4.49	3.97	1.46	2.27	1.87	2.33	1.29
Singapur	6.07	6.45	5.45	5.62	6.09	6.03	5.21	4.65	4.32	5.29	6.33	5.42	2.42	3.07
Slovak cumhuriyeti	4.01	5.61	6.50	4.70	5.37	4.08	3.91	4.95	4.84	1.75	4.19	4.34	3.43	1.53
Slovenya	4.33	6.20	6.03	4.91	5.22	4.83	3.72	4.63	5.07	2.46	4.76	5.40	3.78	1.46
Güney Afrika	5.28	3.93	3.77	4.64	4.43	4.68	2.38	5.25	3.62	3.41	3.40	4.40	4.41	3.38
İspanya	4.39	6.16	6.28	4.94	5.50	5.91	3.95	4.52	4.63	5.00	5.19	6.66	4.91	6.85
Sri Lanka	4.69	5.53	5.28	4.47	3.65	5.16	3.11	5.55	3.90	2.62	3.90	3.22	4.06	1.65
İsveç	5.46	6.22	6.11	5.53	6.34	4.62	4.09	4.05	5.32	4.59	4.59	5.04	3.08	2.97
İsviçre	6.00	6.41	6.53	5.74	6.35	5.58	4.13	2.81	5.80	4.94	5.89	6.20	3.74	2.87
Tayvan	5.16	6.02	6.05	5.31	5.49	4.72	4.21	5.19	4.10	3.55	5.16	4.54	3.44	3.15
Tacikistan	4.27	5.68	5.68	4.92	2.35	4.03	2.55	4.68	4.01	2.18	2.59	2.12	2.75	1.34
Tanzanya	4.15	5.05	2.93	3.57	2.70	4.84	3.25	5.35	4.22	2.03	2.57	2.85	4.93	1.50

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 6. Karar matrisi (devamı)

ÜLKE	KRİTER DEĞERLERİ													
	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	D.1	D.2
Tayland	4.74	4.00	4.90	4.90	4.79	5.05	3.76	5.61	3.57	4.56	3.11	5.76	4.95	2.83
Trinidad ve Tobago	4.39	4.09	5.14	4.48	4.83	3.69	3.54	4.83	3.76	4.08	4.21	4.10	2.71	1.31
Tunus	4.45	4.68	5.18	3.99	4.30	4.81	2.95	5.89	3.93	2.34	2.71	4.08	2.55	1.55
Türkiye	4.49	4.05	5.43	4.26	4.31	4.32	3.86	4.86	3.68	4.74	3.54	4.74	2.98	4.10
Uganda	4.28	4.61	2.75	3.98	2.80	4.07	3.03	4.97	4.35	1.78	2.28	3.05	3.73	1.58
Ukrayna	3.71	3.51	6.63	4.89	4.15	4.29	2.94	5.19	3.86	2.40	3.01	4.00	2.26	2.14
Birleşik Arap Emirlikleri	5.85	6.60	5.44	5.21	6.09	5.07	2.96	5.02	4.48	5.84	4.89	5.37	2.57	2.18
Birleşik Krallık	5.86	5.34	5.83	5.50	6.19	4.98	4.24	2.83	4.70	5.20	5.36	6.16	4.64	5.96
Amerika Birleşik Devletleri	5.44	5.23	5.71	5.49	5.97	5.33	4.02	4.36	3.65	5.96	4.59	6.59	4.90	4.84
Uruguay	4.62	5.47	5.97	4.60	5.45	5.27	2.75	3.97	3.93	2.06	2.78	4.39	2.53	1.82
Venezuela	2.43	3.28	5.10	3.94	3.50	3.40	2.18	5.47	3.68	2.05	2.03	3.10	4.60	2.21
Vietnam	4.45	5.56	5.04	4.91	4.18	4.03	2.99	5.35	3.35	2.81	3.12	2.65	4.02	3.02
Yemen	3.53	2.80	3.85	3.19	2.32	2.44	1.32	5.92	2.78	1.50	2.04	2.20	1.86	1.33
Zambiya	4.63	5.40	2.70	4.09	2.81	3.86	2.90	4.80	4.58	1.86	2.35	2.63	3.69	1.27
Zimbabve	2.98	5.52	2.88	3.63	2.87	3.88	2.90	5.07	4.13	1.87	2.41	2.79	3.61	1.45

EDAS yöntemi ile ilk olarak bütün kriterlere göre ortalama çözüm bulunmuş ve buna göre PDA, NDA değerleri hesaplanmıştır. PDA ve NDA kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı toplamları SP ve SN değerleri hesaplanmış ve Tablo 7’ de verilmiştir. Normalize edilmiş SP ve SN değerlerinin ortalamalarından ise AS değerleri hesaplanmıştır. AS değerine göre ülkeler sıralanmış ve STRE sıralaması ile karşılaştırılmıştır. STRE değeri ve sıralaması, AS değeri ve EDAS sıralaması ve bunlar arasındaki farklar Tablo 8’ de verilmiştir. Şekil 6’ da bu değerlerin grafik üzerinde gösterimleri yer almaktadır.

Tablo 7. SP ve SN değerleri

SN	Arnavutluk	Cezayir	Arjantin	Ermenistan	Avustralya	Avusturya
SP	0.143	0.28	0.069	0.114	0.026	0.025
SN	Azerbaycan	Bahreyn	Bangladeş	Barbados	Belçika	Benin
SP	0.009	0.03	0.08	0.013	0.379	0.244
SN	Azerbaycan	Bahreyn	Bangladeş	Barbados	Belçika	Benin
SP	0.082	0.077	0.261	0.095	0.039	0.294
SN	Butan	Bolivya	Bosna Hersek	Botsvana	Brezilya	Bulgaristan
SP	0.072	0.173	0.243	0.108	0.079	0.069
SN	Burundi	Kamboçya	Kamerun	Kanada	Yeşil Burun	Çad
SP	0.081	0.018	0.003	0.039	0.191	0.062
SN	Burundi	Kamboçya	Kamerun	Kanada	Yeşil Burun	Çad
SP	0.369	0.11	0.308	0.009	0.059	0.328
SN	Şili	Çin	Kolombiya	Kongo	Kosta Rika	Fildişi
SP	0	0.055	0.005	0.389	0.06	0.001
SN	Şili	Çin	Kolombiya	Kongo	Kosta Rika	Fildişi
SP	0.021	0.019	0.086	0.418	0.036	0.189
SN	Hırvatistan	Kıbrıs	Çek Cumhuriyeti	Danimarka	Dominik	Ekvador
SP	0.058	0.259	0.074	0.02	0.152	0.006
SN	Hırvatistan	Kıbrıs	Çek Cumhuriyeti	Danimarka	Dominik	Ekvador
SP	0.011	0.034	0.039	0.032	0.055	0.047
SN	Mısır	El Salvador	Estonya	Etiyopya	Finlandiya	Fransa
SP	0.097	0.124	0.075	0.113	0.103	0.074
SN	Mısır	El Salvador	Estonya	Etiyopya	Finlandiya	Fransa
SP	0.069	0.143	0.032	0.196	0.028	0.019
SN	Gabon	Gambiya	Gürcistan	Almanya	Gana	Yunanistan
SP	0.086	0.025	0.129	0.003	0.143	0.369
SN	Gabon	Gambiya	Gürcistan	Almanya	Gana	Yunanistan
SP	0.278	0.169	0.094	0.017	0.238	0.006
SN	Guatemala	Honduras	Hong Kong	Macaristan	İzlanda	Hindistan
SP	0.02	0.04	0.041	0.326	0.002	0.234
SN	Guatemala	Honduras	Hong Kong	Macaristan	İzlanda	Hindistan
SP	0.125	0.1	0.016	0.022	0.046	0.07
SN	Guatemala	Honduras	Hong Kong	Macaristan	İzlanda	Hindistan
SP	0.044	0.059	0.363	0.078	0.296	0.19

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 7. SP ve SN değerleri (devamı)

SN	Endonezya	İran	İrlanda	İsrail	İtalya	Jamaika
SP	0.023	0.182	0.031	0.083	0.025	0.099
SN	Japonya	Ürdün	Kazakistan	Kenya	Kore Cumhuriyeti	Kuveyt
SP	0.007	0.078	0.113	0.078	0.029	0.205
SN	Kırgız Cumhuriyeti	Lao PDR	Letonya	Lübnan	Lesotho	Litvanya
SP	0.233	0.116	0.038	0.123	0.242	0.095
SN	Lüksemburg	Makedonya	Madagaskar	Malawi	Malezya	Mali
SP	0.032	0.129	0.164	0.271	0.005	0.251
SN	Malta	Moritanya	Mauritius	Meksika	Moldova	Moğolistan
SP	0.03	0.298	0.055	0.015	0.251	0.178
SN	Karadağ	Fas	Mozambik	Namibya	Nepal	Hollanda
SP	0.057	0.036	0.204	0.045	0.143	0.043
SN	Yeni Zelanda	Nikaragua	Nijerya	Norveç	Umman	Pakistan
SP	0.013	0.111	0.268	0.031	0.05	0.236
SN	Panama	Paraguay	Peru	Filipinler	Polonya	Portekiz
SP	0.011	0.187	0.081	0.063	0.058	0.001
SN	Katar	Romanya	Rusya	Ruanda	Suudi Arabistan	Senegal
SP	0.07	0.115	0.052	0.143	0.064	0.229
SN	Sırbistan	Sierra Leone	Singapur	Slovak cumhuriyeti	Slovenya	G. Afrika
SP	0.178	0.292	0.026	0.129	0.058	0.032
SN	İspanya	Sri Lanka	İsveç	İsviçre	Tayvan	Tacikistan
SP	0.009	0.05	0.025	0.051	0.001	0.169
SN	Tanzanya	Tayland	Trinidad ve Tobago	Tunus	Türkiye	Uganda
SP	0.116	0.018	0.098	0.099	0.03	0.169
SN	Ukrayna	Birleşik Arap E.	Birleşik Krallık	ABD	Uruguay	Venezuela
SP	0.109	0.024	0.05	0.017	0.134	0.214
SN	Vietnam	Yemen	Zambiya	Zimbabve		
SP	0.074	0.406	0.187	0.179		

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 8. STRE, EDAS sıralamaları ve arasındaki fark

ÜLKE	STRE		AS Değeri	EDAS Sıra	Fark	ÜLKE	STRE		AS Değeri	EDAS Sıra	Fark
	Değeri	Sıra					Değeri	Sıra			
Arnavutluk	3.35	98	0.34	101	3	Lübnan	3.37	96	0.42	84	12
Cezayir	3.07	118	0.20	124	6	Lesotho	2.84	128	0.24	117	11
Arjantin	4.05	50	0.51	63	13	Litvanya	3.91	56	0.45	79	23
Ermenistan	3.53	84	0.38	95	11	Lüksemburg	4.49	28	0.64	33	5
Avustralya	5.1	7	0.91	5	2	Makedonya	3.49	89	0.36	96	7
Avusturya	4.86	12	0.75	23	11	Madagaskar	2.99	121	0.31	106	15
Azerbeycan	3.7	71	0.46	77	6	Malawi	2.91	123	0.18	128	5
Bahreyn	3.89	60	0.51	62	2	Malezya	4.5	26	0.76	21	5
Bangladeş	2.89	125	0.19	126	1	Mali	2.78	130	0.20	123	7
Barbados	3.91	58	0.61	41	17	Malta	4.25	36	0.73	26	10
Belçika	4.54	21	0.64	34	13	Moritanya	2.64	132	0.14	131	1
Benin	2.84	127	0.15	130	3	Mauritius	3.92	55	0.60	44	11
Butan	3.61	78	0.51	64	14	Meksika	4.54	22	0.73	27	5
Bolivya	3.34	99	0.31	105	6	Moldova	3.09	117	0.22	120	3
Bosna Hersek	3.12	113	0.21	122	9	Moğolistan	3.31	102	0.32	102	0
Botsvana	3.52	85	0.42	85	0	Karadağ	3.68	72	0.46	75	3
Brezilya	4.49	27	0.63	39	12	Fas	3.81	65	0.53	55	10
Bulgaristan	4.14	45	0.49	69	24	Mozambik	2.91	122	0.26	115	7
Burundi	2.57	134	0.06	134	0	Namibya	3.59	82	0.49	68	14
Kamboçya	3.32	101	0.43	83	18	Nepal	3.28	103	0.40	91	12
Kamerun	2.88	126	0.14	132	6	Hollanda	4.64	17	0.75	24	7
Kanada	4.97	9	0.94	3	6	Yeni Zelanda	4.68	16	0.82	12	4
Yeşil Burun Adaları	3.55	83	0.50	66	17	Nikaragua	3.44	92	0.41	87	5
Çad	2.52	135	0.11	133	2	Nijerya	2.82	129	0.18	127	2
Şili	4.06	48	0.54	51	3	Norveç	4.64	18	0.79	14	4
Çin	4.72	15	0.78	17	2	Umman	3.78	66	0.48	73	7
Kolombiya	3.83	62	0.48	71	9	Pakistan	2.89	124	0.23	118	6
Kongo	2.64	133	0.02	136	3	Panama	4.37	35	0.78	19	16
Kosta Rika	4.22	38	0.63	36	2	Paraguay	3.15	110	0.31	104	6
Fildişi Sahili	3.16	109	0.28	112	3	Peru	4.04	51	0.51	61	10
Hırvatistan	4.42	32	0.60	43	11	Filipinler	3.6	79	0.49	70	9
Kıbrıs	4.02	52	0.60	42	10	Polonya	4.11	46	0.51	65	19
Çek Cumhuriyeti	4.22	39	0.54	53	14	Portekiz	4.74	14	0.78	16	2
Danimarka	4.43	31	0.59	46	15	Katar	4.08	47	0.59	45	2
Dominik Cumhuriyeti	3.62	76	0.55	49	27	Romanya	3.78	68	0.39	93	25
Ekvador	3.91	57	0.53	56	1	Rusya Federasyonu	4.15	43	0.63	38	5
Mısır	3.64	74	0.52	59	15	Ruanda	3.36	97	0.34	99	2
El Salvador	3.28	105	0.36	97	8	Suudi Arabistan	3.82	63	0.52	60	3
Estonya	4.23	37	0.61	40	3	Senegal	3.14	111	0.23	119	8
Etiyopya	3.1	116	0.27	114	2	Sırbistan	3.38	95	0.29	111	16
Finlandiya	4.4	33	0.63	37	4	Sierra Leone	2.69	131	0.15	129	2
Fransa	5.32	2	0.91	6	4	Singapur	4.85	13	0.92	4	9
Gabon	3.06	119	0.19	125	6	Slovak Cumhuriyeti	3.9	59	0.40	92	33

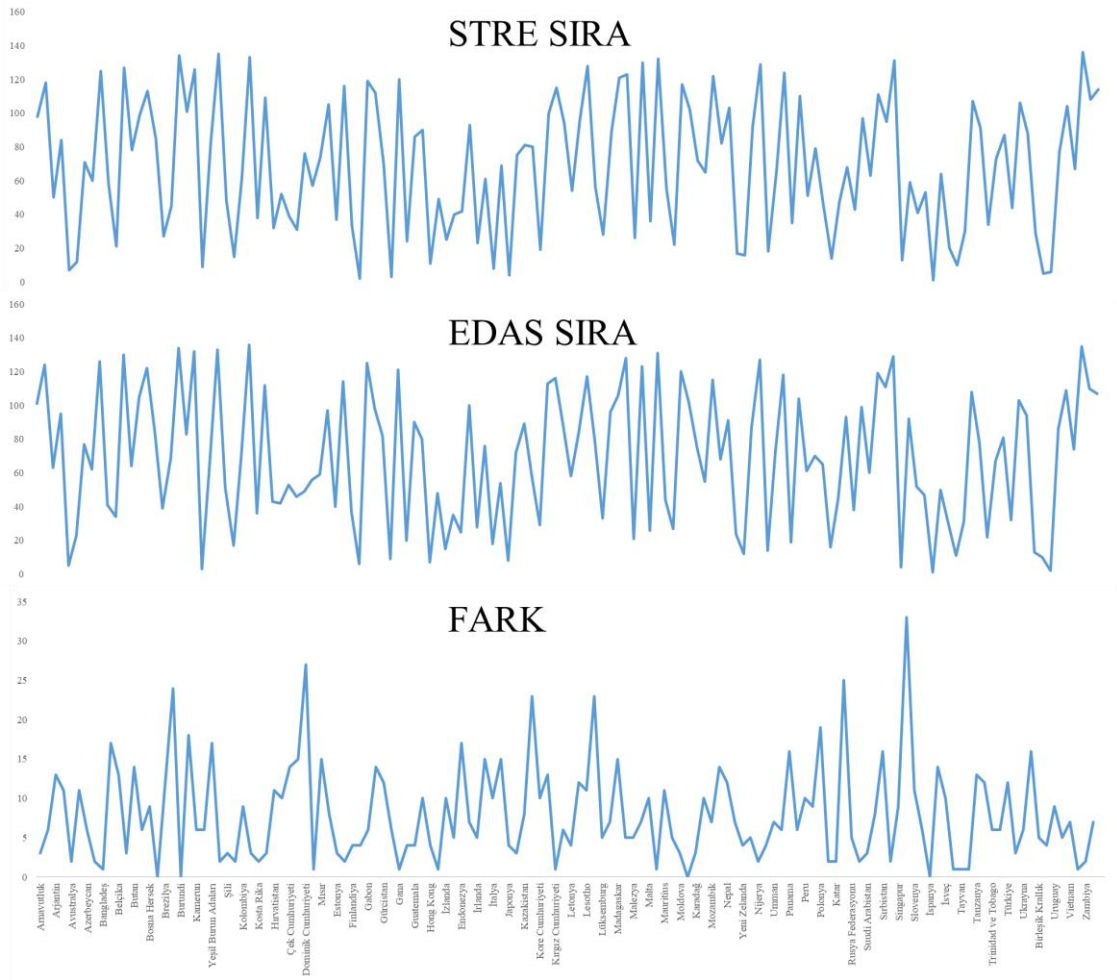
BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tablo 8. STRE, EDAS sıralamaları ve arasındaki fark (devamı)

Gambiya	3.12	112	0.34	98	14	Slovenya	4.18	41	0.54	52	11
Gürcistan	3.7	70	0.43	82	12	Güney Afrika	4.01	53	0.58	47	6
Almanya	5.28	3	0.86	9	6	İspanya	5.43	1	0.99	1	0
Gana	3.04	120	0.22	121	1	Sri Lanka	3.81	64	0.55	50	14
Yunanistan	4.51	24	0.76	20	4	İsveç	4.55	20	0.70	30	10
Guatemala	3.51	86	0.40	90	4	İsviçre	4.94	10	0.83	11	1
Honduras	3.49	90	0.45	80	10	Tayvan	4.47	30	0.66	31	1
Hong Kong	4.86	11	0.90	7	4	Tacikistan	3.18	107	0.30	108	1
Macaristan	4.06	49	0.56	48	1	Tanzanya	3.45	91	0.45	78	13
İzlanda	4.5	25	0.79	15	10	Tayland	4.38	34	0.76	22	12
Hindistan	4.18	40	0.64	35	5	Trinidad ve Tobago	3.67	73	0.49	67	6
Endonezya	4.16	42	0.74	25	17	Tunus	3.5	87	0.44	81	6
İran	3.43	93	0.34	100	7	Türkiye	4.14	44	0.66	32	12
İrlanda	4.53	23	0.73	28	5	Uganda	3.2	106	0.32	103	3
İsrail	3.84	61	0.46	76	15	Ukrayna	3.5	88	0.38	94	6
İtalya	4.99	8	0.78	18	10	Birleşik Arap E.	4.49	29	0.81	13	16
Jamaika	3.71	69	0.54	54	15	Birleşik Krallık	5.2	5	0.86	10	5
Japonya	5.26	4	0.89	8	4	ABD	5.12	6	0.95	2	4
Ürdün	3.63	75	0.48	72	3	Uruguay	3.61	77	0.41	86	9
Kazakistan	3.59	81	0.40	89	8	Venezuela	3.28	104	0.30	109	5
Kenya	3.59	80	0.52	57	23	Vietnam	3.78	67	0.46	74	7
Kore Cumhuriyeti	4.57	19	0.70	29	10	Yemen	2.44	136	0.04	135	1
Kuveyt	3.33	100	0.27	113	13	Zambiya	3.18	108	0.29	110	2
Kırgız Cumhuriyeti	3.1	115	0.24	116	1	Zimbabve	3.11	114	0.30	107	7
Lao PDR	3.4	94	0.41	88	6						

Tablo 8 ve Şekil 6 incelendiğinde STRE ile elde edilen sıralama ile BWM-EDAS yöntemleri ile elde edilen sıralamalar arasında birçok ülkede farklılıklar vardır. Sadece 4 ülkenin sıralamasında değişiklik olmamıştır. 53 ülkeninse sıralamasında 5 ve daha az farklılık oluşmuştur. Ancak 19 ülkenin sıralamasında ise 15 ve daha fazla farklılık oluşmuştur.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 6. STRE, EDAS sıralamaları ve arasındaki fark

4. SONUÇLAR

Ülkelerin S&T rekabet edebilirliği politika bileşenleri üzerinde potansiyel bir etkisi vardır. STRE endeksi hesaplanırken kriter ağırlıkları eşit düşünülerek her bir kriterden alınan puanın ortalaması alınmaktadır. Hâlbuki kriterlerin önemleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle ülkelerin ÇKKV yaklaşımları gibi daha ayrıntılı bir teknikte değerlendirmesi daha önemlidir. Bu çalışmada, ülkelerin S&T rekabet edebilirliği BWM-EDAS yöntemi ile değerlendirilmiştir. BWM yöntemi ile kriter ağırlıkları değerlendirilmiştir. Daha sonra her bir ülke EDAS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Böylece, ülkeler daha gerçekçi bir bakış açısı ile incelenebilmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Crouch, G.I., Ritchie, J.B.R.: Tourism, competitiveness, and societal prosperity. *Journal of Business Research* 44(3), 137–152 (1999)
- [2] Buhalis, D.: Marketing the competitive destination in the future. *Tourism Management* 21(1), 97–116 (2000)
- [3] Ozmen and Aydoğan (2020). Travel & Tourism competitiveness of economies around the world using Rough SWARA and TODIM method In *Strategic Innovative Marketing and Tourism*. Springer, Cham.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

- [4] Cracolici, M.F., Nijkamp, P.: The attractiveness and competitiveness of tourist destinations: A study of Southern Italian regions. *Tourism Management* 30(3), 336–344 (2008)
- [5] Zhang, H., Gu, C.L., Gu, L.W., Zhang, Y.: The evaluation of tourism destination competitiveness by TOPSIS and information entropy-A case in the Yangtze River Delta of China. *Tourism Management* 32(2), 1–9 (2010) 9. Kozak, M., Rimmington, M.: Measuring tourist
- [6] Kozak, M., Rimmington, M.: Measuring tourist destination competitiveness: conceptual considerations and empirical findings. *International Journal of Hospitality Management* 18(3), 273–283 (1999)
- [7] Cracolici, M.F., Nijkamp, P.: The attractiveness and competitiveness of tourist destinations: A study of Southern Italian regions. *Tourism Management* 30(3), 336–344 (2008)
- [8] Wu, Wei-Wen. "Beyond Travel & Tourism competitiveness ranking using DEA, GST, ANN and Borda count." *Expert Systems with Applications* 38.10 (2011): 12974-12982.
- [9] Peng, Kua-Hsin, and Gwo-Hshiung Tzeng. "Strategies for promoting tourism competitiveness using a hybrid MCDM model." *Intelligent decision technologies*. Springer, Berlin, Heidelberg, (2012) 107-115.
- [10] Peng, Kua-Hsin, and Gwo-Hshiung Tzeng. "Improvement tourism competitiveness using hybrid fuzzy MCDM." 2012 International conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY2012). IEEE, (2012)
- [11] Crotti, Roberto, and Tiffany Misrahi. "The travel & tourism competitiveness report 2017. Paving the way for a more sustainable and inclusive future." World Economic Forum: Geneva, Switzerland. (2017)
- [12] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- [13] Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
- [14] Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019). The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*.
- [15] Özmen, M., & Aydoğan, E. K. (2020). Robust multi-criteria decision making methodology for real life logistics center location problem. *Artificial Intelligence Review*, 53(1), 725-751.
- [16] Rezaei, J., van Roekel, W. S., & Tavasszy, L. (2018). Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method. *Transport Policy*, 68, 158-169.
- [17] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.
- [18] Li, Y. Y., Wang, J. Q., & Wang, T. L. (2019). A linguistic neutrosophic multi-criteria group decision-making approach with EDAS method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(3), 2737-2749.
- [19] Ouenniche, J., Uvalle Perez, O. J., & Ettouhami, A. (2019). A new EDAS-based in-sample-out-of-sample classifier for risk-class prediction. *Management Decision*, 57(2), 314-323.
- [20] Ghorabae, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2017). Multi-criteria group decision-making using an extended EDAS method with interval type-2 fuzzy sets.
- [21] Ghorabae, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2017). A new multi-criteria model based on interval type-2 fuzzy sets and EDAS method for supplier evaluation and order allocation with environmental considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 156-174.

BWM-EDAS YÖNTEMİ İLE ÜLKELERİN SEYAHAT VE TURİZM REKABET EDEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

- [22] Kahraman, C., Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Cevik Onar, S., Yazdani, M., & Oztaysi, B. (2017). Intuitionistic fuzzy EDAS method: an application to solid waste disposal site selection. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1), 1-12.
- [23] Turskis, Z., Morkunaite, Z., & Kutut, V. (2017). A hybrid multiple criteria evaluation method of ranking of cultural heritage structures for renovation projects. *International journal of strategic property management*, 21(3), 318-329.
- [24] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.

LOJİSTİK REKABET GÜCÜNÜN BWM-MABAC YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Mihrimah Özmen ^{1*}

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü / Erciyes Üniversitesi, Türkiye

mihrimah@erciyes.edu.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), hükümetlerin küresel refahını arttırmak ve ekonomik büyüme yoluyla ortak sorunlara çözüm aramak için lojistik faaliyetlerin önemli bir rol oynadığı ve finansal istikrara katkıda bulunduğu bir forum sunmaktadır. Lojistik sektörü, ekonomik kalkınmanın temel unsurunu oluşturmaktadır ve de uluslararası ticaret faaliyetlerinde rekabet edebilmek için etkili ticari ve uluslararası lojistik yeteneğine sahip olmak önemlidir. Bu nedenle, OECD ülkeleri lojistik sektörlerini kapsamlı bir hale getirebilmek için stratejiler geliştirmeye büyük önem vermektedir. Ülkelerin lojistik rekabet gücü Lojistik Performans Endeksi (LPI) değerine göre değerlendirilmektedir. LPI değerleri hesaplanırken ülkelere ait bütün kriter puanlarının ortalamaları alınmaktadır. Her ne kadar ülkelerin lojistik rekabet gücü literatürdeki çalışmalarda karşılaştırılmış olsa da, lojistik rekabet gücü değerlendirmesinde, kriterlerin önem farklılıklarının dikkate alınabilmesi ve de çok sayıda kriterin değerlendirilebilmesi için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, OECD ülkelerinin lojistik rekabet gücü BWM-MABAC yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Literatürde lojistik rekabet gücünün, ticaretin gelişmesi, ihracatın çeşitlendirilmesi, doğrudan yabancı yatırım ve ekonomik büyüme ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir. Lojistik rekabet gücü ile örtüşen birçok hedef vardır [1-6]. Bunlardan bazıları ise: Kalite [2], Tedarikçi performansı [3], üretkenlik [4], Verimlilik [5], Rekabetçi konum [7], İşletim performansı [8], Dağıtım etkinliği [9, 10], finansal istatistikler (örneğin net gelir, brüt satışlar), Maliyet istatistikleri (örneğin nakliye maliyeti, standart işçilik maliyetleri), firma değerlendirmesi [11], atık yönetimi [12] ve girdi / çıktı ölçüleri veya performans kriterleri (örneğin sevkiyat sayısı / araç saati) [1] vb. Literatürde, lojistik rekabet edebilirliği hakkında birçok çalışma yer almaktadır: Ambrosini ve Routhier [12] Avrupa, Amerika ve Asya'nın dokuz ülkesinin lojistik sektörü amaçlarını, yöntemlerini ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Gergin ve Bakı [13] Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS yöntemlerini kullanan Türkiye bölgelerinin lojistik rekabet gücünü sıralamıştır. Yang ve Chen [13], AHP ve Gri İlişkisel Analiz (GRA) kullanarak lojistik rekabet gücüne göre Kuzeydoğu Asya'daki üç büyük uluslararası merkez limanını karşılaştırmış ve araştırmışlardır. Özceylan ve diğ. [14], Türkiye'nin illerinin lojistik rekabet edebilirlik değerlendirmesini dikkate almıştır. 16 coğrafi ve ekonomik göstergenin lojistik skorlarını belirlemek için coğrafi bilgi sistemi ve ÇKKV araçlarını kullanmıştır.

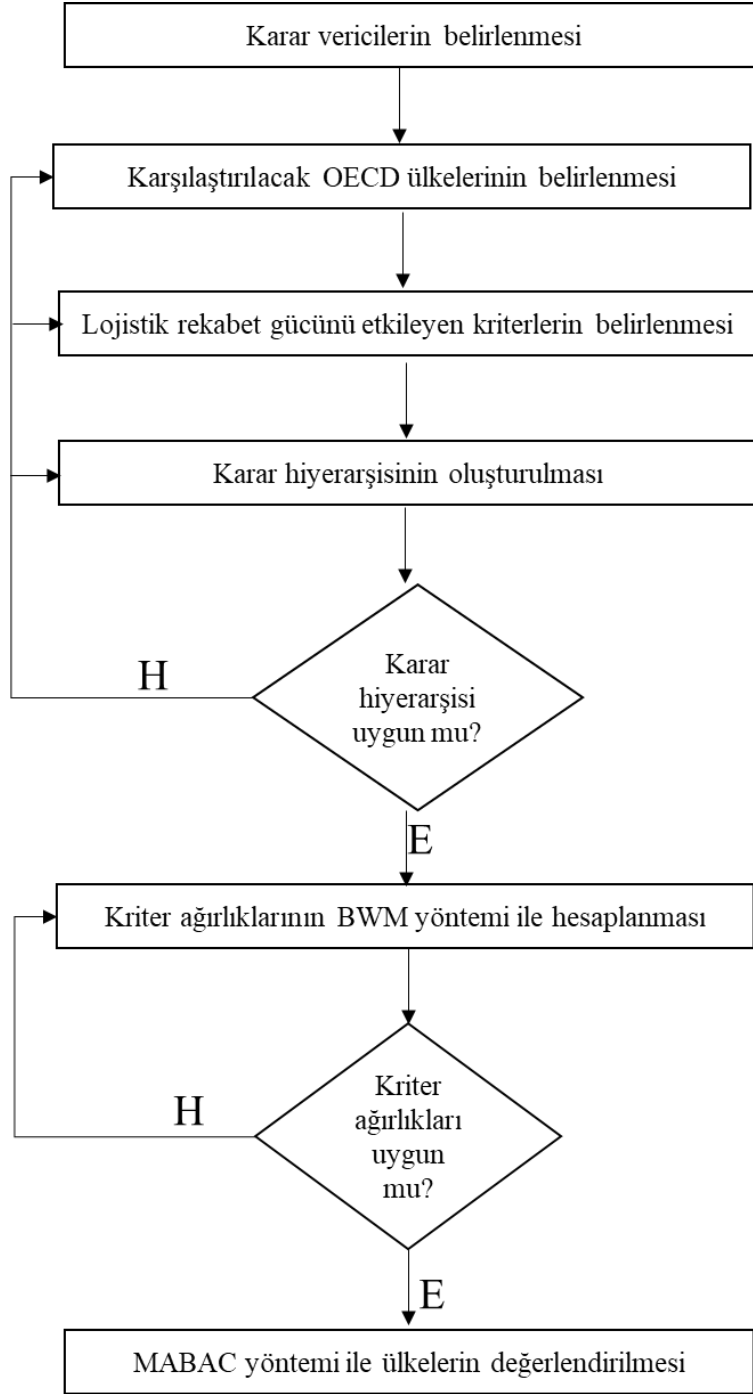
Temelleri İkinci Dünya Savaşı'na kadar uzanan OECD, 30 Eylül 1961'de ülkeler arasındaki sözleşmenin resmen yürürlüğe girdiği tarihte kurulmuştur. Bugün, dünyanın dört bir yanından 35 OECD üyesi, ulusal sorunları tanımlamak, tartışmak ve analiz etmek ve çözmek için bir araya gelmektedir. OECD ülkeleri hakkında literatürde ÇKKV alanında az ve yetersiz sayıda çalışma yer almaktadır [5-21].

Küresel gelişmelerin lojistik açısından karşılaştırabilmek için ülkelerin lojistik rekabet gücünün değerlendirilmesi önemlidir. Bunun için Dünya Bankası LPI kullanmaktadır. OECD ülkelerinin lojistik rekabet edebilirliği konusunda literatürde çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Güner ve Coşkun [6] OECD ülkelerinin lojistik rekabet gücünü LPI skorları ile sosyal, ekonomik

göstergeleri arasındaki ilişkiyi bir regresyon analizi kullanarak incelemiştir. Yu ve Hsiao [22] VZA modeli uygulayarak farklı gelir düzeylerine göre OECD ülkelerini sınıflandırarak ve karşılaştırarak teknoloji grupları arasındaki farklılıkların LPI puanlarını dikkate almışlardır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

OECD ülkelerinin lojistik rekabet gücünü değerlendirme problemi için Şekil 1’ de verilen üç aşamalı metodoloji önerilmiştir. İlk aşama, karşılaştırılacak OECD ülkelerinin ve lojistik rekabet gücünü etkileyen kriterlerin belirlenmesini içerir. İkinci aşama, BWM kullanılarak her ana kriterin ve alt kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasını içerir ve son aşama, MABAC yöntemi kullanılarak OECD ülkelerinin bu kriterlere göre değerlendirilmesini içerir. Bu aşamaların her biri ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır. Bu bölümde öncelikle kriterlerin önemini ve alternatiflerin sıralamasını değerlendirmek için kullanılan BWM ve MABAC yöntemleri açıklanmıştır.



Şekil 1. OECD ülkelerinin lojistik rekabet gücünün değerlendirilmesi metodolojisi

2.1. BWM

BWM yöntemi 2015 yılında Rezaei tarafından geliştirilmiştir [23]. Bu yöntem sayesinde, daha az ikili karşılaştırma yapılarak kriter ağırlıkları elde edilebilmektedir. BWM sadece diğer kriterleri en iyi ve en kötü kriterlerle karşılaştırır. Orijinal BWM, ilk olarak doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak önerilmişti ancak 2016 yılında [24], daha az ikili karşılaştırmayla daha kolay benzersiz sonuçlar elde edebilen BWM için doğrusal model de önerilmiştir. Doğrusal BWM yöntemi de tutarlı bir şekilde güvenilir sonuçlar vermektedir.

BWM, karar vericilerin karmaşık karar verme problemlerini çözümlenmeleri için uygun bir metodolojidir. BWM ayrıca birçok gerçek hayat problemine de uygulanmıştır: havayolu endüstrisi,

enerji, yatırım, yer seçimi, üretim, performans değerlendirme, tedarikçi seçimi, tedarik zinciri, teknoloji, ulaşım, su yönetimi, vb. [25]. Ayrıca lojistik performans endeksi göstergelerinin göreceli önemi [26] ve üçüncü parti lojistik sağlayıcısı [27] hakkında BWM' nin lojistik sektöründeki uygulamaları da yer almaktadır.

Doğrusal BWM yönteminde kriter ağırlıklarını elde etmek için beş adım uygulanır [24]. Bunlar aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Kriter kümesi belirlenir $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

Adım 2: Kriter kümesinden en iyi ve en kötü kriterler belirlenir.

Adım 3: Diğer kriterler en iyi kriterle karşılaştırılır. Karşılaştırmalarda, önem düzeyini belirtmek için 1 ile 9 arasında bir sayı atanır. (1 ile 9 ölçüm skalasının tanımı: 1 = eşit önemde, 3 = biraz daha önemli (az üstünlük), 5 = oldukça önemli (fazla üstünlük), 7 = çok önemli (çok üstünlük), 9 = son derece önemli (kesin üstünlük), 2, 4, 6 ve 8 = ara değerler).

En iyi ve diğerleri vektörü:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

Denklemden a_{Bj} , kriter j üzerindeki en iyi kriter B 'nin önemini belirtir. Ayrıca $a_{BB} = 1$ ' dir.

Adım 4: Diğer kriterler en kötü kriterle karşılaştırılır. Karşılaştırmalarda 1 ile 9 arasında bir sayı atanır.

En kötü ve diğerleri vektörü:

$$A_w = (a_{1w}, a_{2w}, \dots, a_{nw})^T \quad (2)$$

Denklemden a_{jw} , en kötü kriter w üzerindeki kriter j ' nin önemini belirtir. Ayrıca $a_{ww} = 1$ ' dir.

Adım 5: Optimal ağırlıklar bulunur.

Aşağıdaki modeli çözerek optimal ağırlıklar $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ ve ξ^L elde edilir.

$$\min \xi^L$$

s.t.

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

$$|w_j - a_{jw}w_w| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

$$\sum_j w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j$$

Bu model için, ξ^L karşılaştırmaların tutarlılığının doğrudan bir göstergesi olarak düşünülebilir. Sıfıra yakın ξ^L değerleri yüksek bir tutarlılık seviyesini gösterir.

2.2. MABAC

MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) yöntemi, Pamučar ve Čirović tarafından geliştirilmiş bir ÇKKV yöntemidir [28]. MABAC yönteminin temeli, her bir alternatifin kriter fonksiyonunun sınır yakınlık alanının uzaklığını esas almaktadır. 6 adımdan oluşan MABAC yöntemi adımları ilerleyen bölümde verilmektedir.

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması (X). İlk olarak m adet alternatif n adet kriterlere göre değerlendirilmektir. Alternatifler vektör biçiminde gösterilir, burada j kriterine göre i alternatifinin

değeri x_{ij} ile gösterilmektedir. ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$). m alternatif sayısını, n ise kriter sayısını ifade etmektedir.

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \left[\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \end{matrix} \right. \\ A_2 & \left[\begin{matrix} x_{21} & x_{22} & & x_{2n} \end{matrix} \right. \\ \dots & \left[\begin{matrix} \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \right. \\ A_m & \left[\begin{matrix} x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (3)$$

Adım 2: Karar matrisinin (X) elemanların normalleştirilmesi.

$$N = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \left[\begin{matrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \end{matrix} \right. \\ A_2 & \left[\begin{matrix} n_{21} & n_{22} & & n_{2n} \end{matrix} \right. \\ \dots & \left[\begin{matrix} \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \right. \\ A_m & \left[\begin{matrix} n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (4)$$

Normalize edilmiş matrisin (N) elemanları aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenir:

- a) Fayda türü kriterler için (kriterin daha yüksek bir değeri tercih edilir)

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (5)$$

- b) Maliyet türü kriterler için (kriterin daha düşük bir değeri tercih edilir)

$$n_{ij} = \frac{x_i^- - x_{ij}}{x_i^- - x_i^+} \quad (6)$$

x_{ij} , x_i^+ ve x_i^- karar matrisinin (X) elemanları olup x_i^+ ve x_i^- aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$x_i^+ = \max(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ve alternatiflere göre gözlemlenen kriterin maksimum değeridir.

$x_i^- = \min(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ve alternatiflere göre gözlemlenen kriterin minimum değeridir.

Adım 3: Ağırlıklandırılmış karar matrisinin (V) oluşturulması. n_{ij} normalize edilmiş matrisin (N) elemanı ve w_i kriter ağırlıkları olup ağırlıklandırılmış karar matrisinin (V) elemanları denklem (7)'ye göre hesaplanır.

$$v_{ij} = w_i \cdot (n_{ij} + 1) \quad (7)$$

n toplam kriter sayısını ve m toplam alternatif sayı olup denklem (7) kullanarak ağırlıklandırılmış karar matrisi V 'yi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1[(n_{11} + 1)] & w_2[(n_{12} + 1)] & \dots & w_n[(n_{1n} + 1)] \\ w_1[(n_{21} + 1)] & w_2[(n_{22} + 1)] & \dots & w_n[(n_{2n} + 1)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1[(n_{m1} + 1)] & w_2[(n_{m2} + 1)] & \dots & w_n[(n_{mn} + 1)] \end{bmatrix}$$

Adım 4: Sınır yakınlık alanı matrisinin (G) belirlenmesi. v_{ij} ağırlıklandırılmış karar matrisinin (V) elemanı ve m toplam alternatif sayısı olup her bir kriter için sınır yakınlık alanı (BAA) denklem (8)' e göre hesaplanır.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad (8)$$

Her bir kriter için g_i değeri hesaplandıktan sonra $n \times 1$ boyutunda sınır yakınlık alanı matrisi (G) oluşturulur. (n toplam kriter sayısı).

$$G = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Adım 5: Alternatiflerin sınır yakınlık alanına olan uzaklıkları hesaplanır ve (Q) matrisi elde edilir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

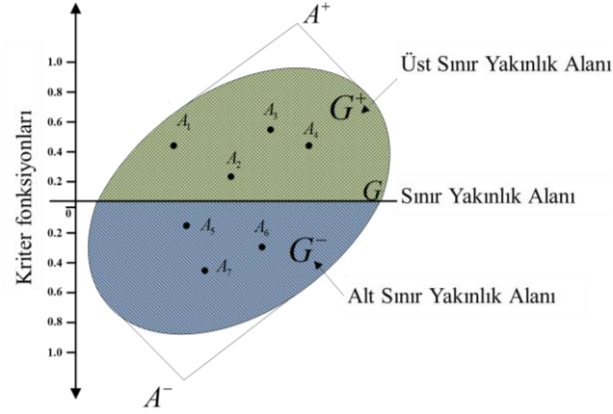
g_i kriter C_i 'ye olan sınır yakınlık alanı değeri ve v_{ij} ağırlıklandırılmış karar matrisi (V)' nin elemanı, n kriter sayısı, m alternatif sayısı olup alternatiflerin sınır yakınlık alanına (q_{ij}) uzaklığı, ağırlıklandırılmış karar matrisi (V) ile sınır yakınlık alanı uzaklığı matrisi (G) arasındaki farka eşittir

$$Q = V - G = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_n \\ g_1 & g_2 & & g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1 & g_2 & \dots & g_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Q = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{12} - g_2 & \dots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{22} - g_2 & \dots & v_{2n} - g_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & \dots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Yapılan hesaplama sonucunda, A_i alternatifi konumlandırılır. Bu bölgeler ise Sınır Yakınlık Alanı (G), Üst Yakınlık Alanı ($G +$) ve Alt Yakınlık Alanı ($G -$) şeklindedir. $G +$ bölgesi ideal alternatifi içerirken, $G -$ bölgesi ise negatif-ideal alternatifi içermektedir (Şekil 1). Bu doğrultuda A_i alternatifinin G , $G +$ ve $G -$ bölgelerine göre konumu eşitlik (15) yardımıyla belirlenir.

Alternatif A_i sınır yakınlık alanına olan uzaklığına göre Sınır Yakınlık (G), Üst Sınır Yakınlık (G^+) veya Alt Sınır Yakınlık (G^-) alanlarından birine ait olabilir, $A_i \in \{G \vee G^+ \vee G^-\}$. Üst Sınır Yakınlık alanı (G^+) ideal alternatifleri (A^+) içerir, Alt Sınır Yakınlık alanı (G^-) negatif ideal alternatifleri (A^-) içerir..



Şekil 2. MABAC Yöntemi Sınır Yakınlık Alanı (Pamuçar ve Čirović, 2015)]

Alternatif A_i 'nin yakınlık alanlarından (G , G^+ or G^-) hangisine ait olduğu denklem (13)' e göre belirlenir.

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Alternatif A_i 'nin küme içerisinde en iyi seçilebilmesi için kriter skorlarının çoğunun üst yakınlık alanında (G^+) yer alması gerekmektedir. Örneğin, eğer alternatif A_i 'nin 5 kriteri üst yakınlık alanında (G^+) ve bir kriteri de alt yakınlık alanında (G^-) ise alternatif A_i 5 kriter için ideal alternatife eşit veya yakın iken bir kriter için anti-ideal alternatife eşit veya yakın demektir. Eğer $q_{ij} > 0$, ise $q_{ij} \in G^+$, alternatif A_i ideal alternatife yakın veya eşittir. Eğer $q_{ij} < 0$, ise $q_{ij} \in G^-$, alternatif A_i anti-ideal alternatife yakın veya eşittir.

Adım 6: Alternatiflerin sıralanması.

Alternatiflerin sınır yakınlık alanına uzaklıkları (q_i) toplamı hesaplanarak alternatiflere ait sıralama elde edilir. Denklem (14) ile hesaplanan en yüksek S_i değerine sahip alternatif optimal alternatiftir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

3. BWM-MABAC İLE OECD ÜLKELERİNİN LOJİSTİK REKABET GÜCÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Lojistik sistemlerinin gücü işletmelerin maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [29]. Örneğin, etkin bir şekilde yönetilen limanlar ve daha uygun hinterland bağlantıları, lojistik ağlar kurma veya hammadde taşıma maliyetlerini düşürebilir. Lojistik sistemleri hem üretim faktörü hem de yatırım kararlarında önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir [30].

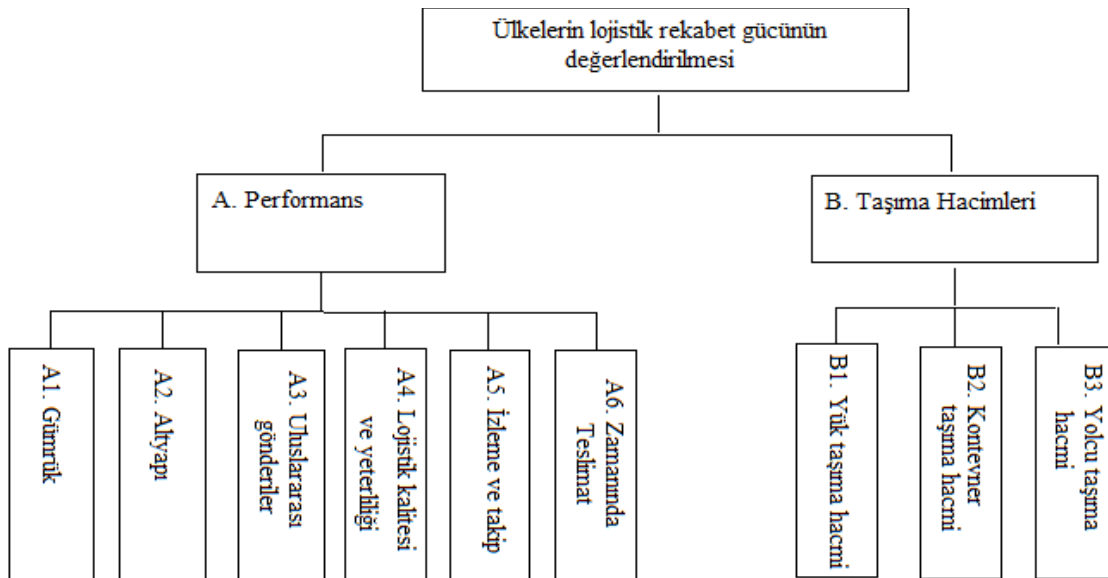
Literatüre göre, doğrudan yabancı yatırımlar ülkeleri lojistik rekabet güçlerine göre tercih etmektedir [31]. Günümüzde ülkelerin lojistik rekabet edebilirlikleri LPI puanları ile değerlendirilmektedir. Sadece dünya çapında lojistik rekabetçiliğinin kapsamlı bir değerlendirmesini analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda zaman içinde anlaşılabilir performans eğilimleri hakkında da bilgi sağlar. Ancak, ülkenin lojistik rekabetçiliğini değerlendirmek için LPI puanlarının ve sıralamalarından daha fazlasına bakmak gerekir. Bu çalışmada, yeni kriterler ve önerilen ÇKKV metodolojisi ile ülkelerin lojistik rekabetçiliğini değerlendirmek için yatırımcılar ve ticaret şirketleri için daha faydalı olan daha ayrıntılı bir bakış açısı sunulmaktadır.

Bu çalışmada, 25 OECD ülkesi genel coğrafi kriterler ve verilerin erişilebilirliği açısından farklı coğrafi bölgelerden belirlenmiştir. Bu ülkeler 9 kritere göre değerlendirilmiştir. Tüm bu kriterler sektörel rekabet edebilirlik üzerinde kritik bir etkiye sahiptir, fakat aynı zamanda birbirine bağımlı kriterlerdir.

Bu bölümde önce sıralamada kullanılan kriterler tanıtılmaktadır. Daha sonra MABAC yöntemi ile OECD ülkelerinin sıralamaları lojistik rekabet güçlerine göre elde edilmektedir.

3.1. Lojistik Rekabet Gücü İçin Veri Kümesi ve Kriterler

Küreselleşme uluslararası ticarete rekabeti önemli ölçüde artırmıştır. Bu durumda lojistik ön plandadır ve ülkeler lojistik alanındaki faaliyetlerine göre değerlendirilmeye başlanmıştır. Etkin bir lojistik performans değerlendirmesi yapabilmek için uluslararası düzeyde kapsamlı performans yaklaşımına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, Dünya Bankası kapsamlı bir uluslararası karşılaştırma ölçütü sunmaktadır: LPI, ülkeleri lojistik açısından değerlendirmek için [33]. LPI, diğer kurum içi kaynaklarla birlikte kullanılır, lojistik performansı ve performans engellerini engelleyen faktörler üzerine tartışmalar başlatabilir [30]. Bununla birlikte, eylem planları ve politikaları ile ilgili ticaret ve ulaştırma performansının kapsamlı ve çok boyutlu olarak değerlendirilmesi gereken LPI'nin ötesinde bir ihtiyaç da vardır.



Şekil 1. Ülkelerin lojistik rekabet gücünün hiyerarşik yapısı [32]

Tablo 1. Kriter tanımları [33-36]

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Tanım
A. Performans	A1 Gümrük	Gümrükleme sürecinin etkinliği
	A2 Altyapı	Ticaret ve ulaştırma ile ilgili altyapının kalitesi
	A3 Uluslararası gönderiler	Rekabetçi bir şekilde fiyatlı gönderiler için düzenleme kolaylığı
	A4 Lojistik kalitesi ve yeterliliği	Lojistik hizmetlerin yeterliliği ve kalitesi
	A5 Takip ve izleme	Sevkiyatları takip ve izleme yeteneği
	A6 Zamanında teslimat	Planlanan veya beklenen teslimat süresi içinde gönderilerin varış noktasına ulaşması
B. Taşıma hacimleri	B1 Yük taşıma hacmi	Belirli bir ağda iç taşımacılığı kullanan malların toplam hareketini ifade eder. Veriler milyon ton-kilometre olarak ifade edilir, bu da bir tonun bir kilometre boyunca taşınmasını temsil eder. Karayolu ve demiryolu bileşenleri mevcuttur.
	B2 Konteynır taşıma hacmi	Malların standart açılıp kapanabilir taşıma kutularında demiryolu ve deniz yoluyla taşınmasını ifade eder. Veriler 20 feet'lik konteyner ile (TEU) ifade edilir.
	B3 Yolcu taşıma hacmi	Belirli bir ağda iç taşımacılığı kullanan yolcuların toplam hareketini ifade ediyor. Veriler milyon yolcu-kilometre cinsinden ifade edilir, bu da bir yolcunun bir kilometre boyunca taşınmasını temsil eder. Karayolu ve demiryolu bileşenleri mevcuttur.

Tablo 2. OECD ülkelerinin karar matrisi

Kriterler	A. Performans						B. Taşıma Hacimleri		
	A1	A2	3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
OECD Ülkeleri	Kriter Değerleri								
Avusturya	3,79	4,08	3,85	4,18	4,36	4,37	88329	1248863	12578
Çek Cumhuriyeti	3,58	3,36	3,65	3,65	3,84	3,94	134075	1548782	182710
Almanya	4,12	4,44	3,86	4,28	4,27	4,45	936848	21126134	2246188
Danimarka	3,82	3,75	3,66	4,01	3,74	3,92	33062	920621	146394
İspanya	3,48	3,72	3,63	3,73	3,82	4	264674	14995617	26670
Estonya	3,41	3,18	3,07	3,18	3,25	4,08	18112	258315	6622
Finlandiya	4,01	4,01	3,51	3,88	4,04	4,14	74885	1543866	138260
Fransa	3,71	4,01	3,64	3,82	4,02	4,25	385773	4515724	1883256
Birleşik Krallık	3,98	4,21	3,77	4,05	4,13	4,33	196938	10230000	65012
Yunanistan	2,85	3,32	2,97	2,91	3,59	3,85	254	4206797	1192
Macaristan	3,02	3,48	3,44	3,35	3,4	3,88	108893	736798	163906
İrlanda	3,47	3,77	3,83	3,79	3,98	3,94	23330	932705	1990
İzlanda	3,13	3,02	3,32	3,26	3,42	3,88	23	0	14602
İsrail	3,5	3,49	3,38	3,6	3,72	4,27	1404	2928228	2645
İtalya	3,45	3,79	3,65	3,77	3,86	4,03	72379	12067218	1717156
Litvanya	3,42	3,57	3,49	3,49	3,68	4,14	89935	509265	57222
Letonya	3,11	3,24	3,28	3,29	3,42	3,62	61707	444823	5548
Meksika	2,88	2,89	3	3,14	3,4	3,38	671632	5682300	1039698
Norveç	3,57	3,95	3,62	3,7	3,82	3,77	3312	995193	3695
Polonya	3,27	3,17	3,44	3,39	3,46	3,8	731456	3660279	19175
Portekiz	3,37	3,09	3,24	3,15	3,65	3,95	2622	3335977	4146
Slovak cumhuriyeti	3,28	3,24	3,41	3,12	3,12	3,81	91337	618227	74520
Slovenya	2,88	3,19	3,1	3,2	3,27	3,47	12990	1323240	680
İsveç	3,92	4,27	4	4,25	4,38	4,45	127984	1546120	276172
Türkiye	3,18	3,49	3,41	3,31	3,39	3,75	601775	9551735	610354

Literatürde yer alan lojistik rekabet gücü değerlendirme ile ilgili çalışmalarda birçok kriter kullanılmıştır. Çakır vd., Yu ve Hsiao, Güner ve Coşkun [6, 22, 37, 38] değerlendirmelerinde LPI göstergelerinden yararlanmışlardır. Güner ve Coşkun [6] LPI göstergelerine ek olarak sosyal göstergeleri de dahil etmişlerdir. Jiang ve Chen [39] kentsel lojistik kapasitesini 10 kritere göre değerlendirmiştir. Kriterler: arz ve talep kapasitesi, ekonomik kalkınma kabiliyeti ve ulaştırma gelişim düzeyi olarak gruplandırılmıştır. Ozceylan vd. [14] bir eyaletin lojistik performansının üç ana boyutta ele alınması gerektiğinden bahsetmiştir: navlun işlem kriterleri, ulaşım kabiliyet kriterleri ve ekonomik ve altyapı kriterleri.

Bu çalışmada, öncelikle lojistik alanındaki literatür incelenip akademisyen ve uzmanların görüşleri alınarak lojistik rekabet edebilirliği etkileyen kriterler belirlenmiştir. OECD ülkelerinin lojistik rekabet gücünü değerlendirmek için, iki ana başlıkta toplam 9 alt kriter değerlendirilmiştir [32]. Ana kriterler “performans” ve “taşıma hacimleri” dir. Kriterlerin hiyerarşik yapısı Şekil 1’de

gösterilmiş ve kriterlerin tanımları Tablo 1'de verilmiştir. Ülkelerin kriter değerleri Dünya Bankası ve OECD 2016 istatistiklerinden alınmıştır [33-36].

Performans ana kriteri 6 alt kriterden oluşmaktadır: Gümrük, Altyapı, Uluslararası gönderiler, Lojistik kalitesi ve yeterliliği, Takip ve izleme ve Zamanında teslimat. Bunlar LPI skor bileşenleridir ve 5 puanlık bir skala kullanılarak değerlendirilmektedir. LPI hesaplanırken, bu 6 alt kriterin ortalaması alınır. Ortalamayı almak yerine, bunları ayrı ayrı değerlendirerek ağırlık bakımından farklılık gösteren kriterler daha anlamlı bir şekilde değerlendirilmiş olacaktır.

3.2. Kriter Ağırlıklarının BWM Yöntemi ile Elde Edilmesi

Karar vericiler tarafından (lojistik uzmanları, akademisyenler ve lojistik firmaları) kriterlerin belirlenmesinden sonraki adım alt kriter ağırlıklarının BWM yöntemiyle hesaplanmasıdır [23]. İlk olarak, karşılaştırılan kriterler grubu arasında en iyi ve en kötü kriterler seçilir. Aşağıdaki Tablo 3 ve 4' de 1 ila 9 ölçeği kullanılarak en iyi / en kötü kriterler diğer tüm kriterlerle karşılaştırılır. Ayrıca, Tablo 3 ve 4' ün son sütununda, ikili karşılaştırmanın tutarlılık değerleri yer almaktadır. Karşılaştırmaların tutarlılık değerleri 0.10'dan daha küçüktür ve bu durum karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Performans ana kriterine ait alt kriterlerin karşılaştırılması

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Tutarlılık
En iyi kriter: A4	6	2	5	1	3	5	0,056
En kötü kriter: A1	1						

Tablo 4. Taşıma hacimleri ana kriterine ait alt kriterlerin karşılaştırılması

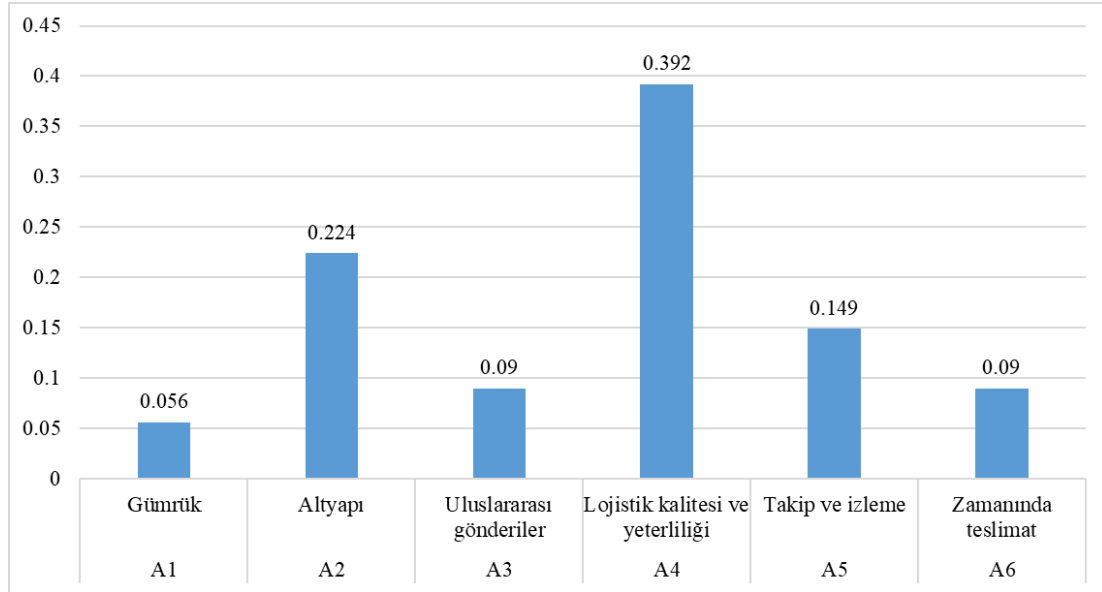
	B1	B2	B3	Tutarlılık
En iyi kriter: B1	1	2	3	0,077
En kötü kriter: B3				

Tüm kriterlerin en iyi / en kötü kriterlerle karşılaştırılmasından sonraki adım, kriter ağırlıklarının elde etmektir. Kriterlerin ağırlıkları Bölüm 2.1 'de açıklanan BWM yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Performans ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları Tablo 5 ve Şekil 2' de verilmiştir.

Tablo 5. Performans ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları

Performans ana kriterine ait alt kriterler	Ağırlıklar
A1 Gümrük	0,056
A2 Altyapı	0,224
A3 Uluslararası gönderiler	0,09
A4 Lojistik kalitesi ve yeterliliği	0,392
A5 Takip ve izleme	0,149
A6 Zamanında teslimat	0,09

Performans ana kriterine ait alt kriterler arasından en önemli ve en yüksek ağırlığı olan kriter A4. Lojistik kalitesi ve yeterliliği ve en düşük öneme ve en düşük ağırlığa sahip kriterler ise A3. Uluslararası gönderiler ve A6. Zamanında teslimat kriterleridir.



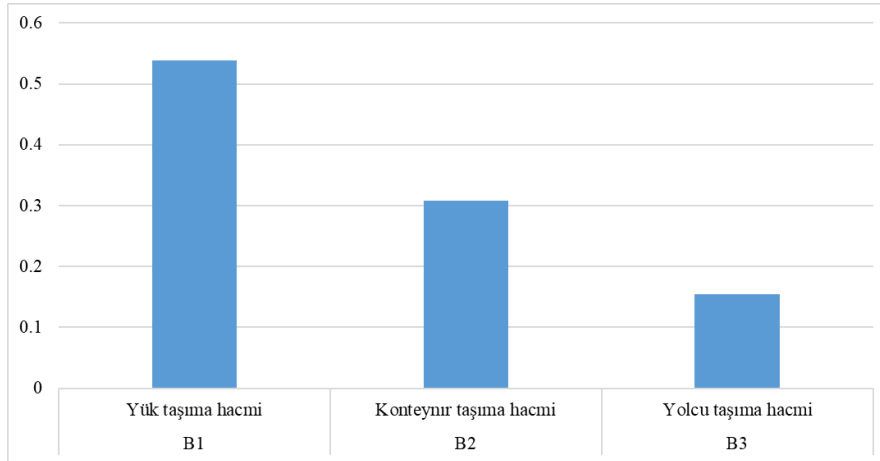
Şekil 2. Performans ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları

Taşıma hacimleri ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları Tablo 6 ve Şekil 3’ te verilmiştir.

Tablo 6. Taşıma hacimleri ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları

Taşıma Hacimleri ana kriterine ait alt kriterler		Ağırlıklar
B1	Yük taşıma hacmi	0,538
B2	Konteynır taşıma hacmi	0,308
B3	Yolcu taşıma hacmi	0,154

Taşıma hacimleri ana kriterine ait alt kriterler arasından en önemli ve en yüksek ağırlığı olan kriter B1.Yük taşıma hacmi ve en düşük öneme ve en düşük ağırlığa sahip kriter ise B3. Yolcu taşıma hacmi kriteridir.



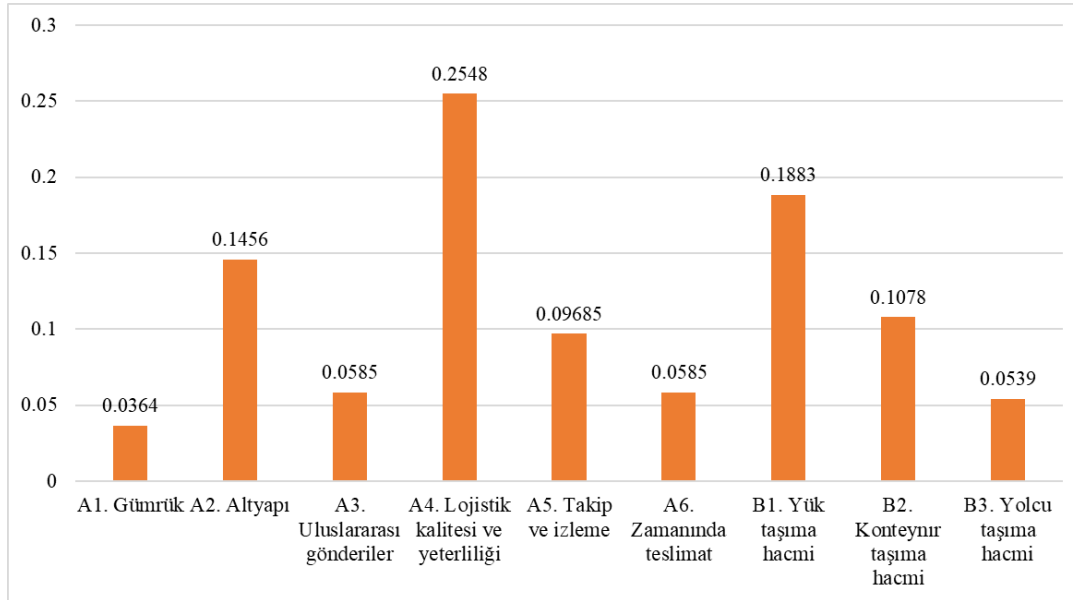
Şekil 3. Taşıma hacimleri ana kriterine ait alt kriterlerin ağırlıkları

Ülkelerin değerlendirmesini etkileyen 2 ana kriter ağırlıkları incelendiğinde, A. Performans % 65 ağırlığa sahipken B. Taşıma hacimleri % 35 ağırlığa sahiptir. Alt kriterlere ait toplam ağırlık değeri ait olduğu ana kriterin ağırlığı ile çarpımından elde edilir. Ana ve alt kriterlere ait toplam ağırlıklar Tablo 7 ve Şekil 4’ te verilmiştir.

Tablo 7. Ana ve alt kriterlere ait ağırlıkları

Ana Kriter	Ağırlık	Alt kriter	Ağırlık	Toplam ağırlık
A. Performans	65.00%	A1. Gümrük	0,056	0,0364
		A2. Altyapı	0,224	0,1456
		A3. Uluslararası gönderiler	0,09	0,0585
		A4. Lojistik kalitesi ve yeterliliği	0,392	0,2548
		A5. Takip ve izleme	0,149	0,09685
		A6. Zamanında teslimat	0,09	0,0585
B. Taşıma hacimleri	35.00%	B1. Yük taşıma hacmi	0,538	0,1883
		B2. Konteynır taşıma hacmi	0,308	0,1078
		B3. Yolcu taşıma hacmi	0,154	0,0539

Ülkelerin değerlendirmesini etkileyen ana kriter ağırlıkları incelendiğinde, “A. % 65 ağırlığa sahip performans alanları “B” den daha önemlidir. En önemli alt kriter “A4. Lojistik kalitesi ve yeterliliği” % 25.48 ağırlığa sahiptir. Bu değer aşağıdaki iki değer çarpılmasıyla elde edilir: “Performans” in ağırlığı (% 65) ve performans alt kriterleri arasındaki “Lojistik kalitesi ve yeterliliği” nin ağırlığı (% 39).



Şekil 4. Alt kriterlere ait toplam ağırlıklar

3.3. OECD Ülkelerinin MABAC Yöntemi ile Değerlendirilmesi

BWM ile kriterlerin ağırlıkları elde edildikten sonra, OECD ülkeleri MABAC yöntemi ile değerlendirilmiştir. MABAC yöntemi ile ilk olarak karar matrisi normalize edilmiş ve normalize karar matrisi kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi elde edilmiştir. Tablo 10’ de verilen sınır yakınlık alan matrisi ağırlıklandırılmış karar matrisinden denklem (8)’ e göre hesaplanmıştır. Tablo 11’ de verilen alternatiflerin sınır yakınlık alanı matrisine uzaklıkları ise Denklem (11) ve (12)’ den hesaplanmıştır.

Tablo 8. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

	A. Performans						B. Taşıma Hacimleri		
Kriterler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
OECD Ülkeleri	Kriter Değerleri								
Avusturya	0.740	0.768	0.854	0.927	0.984	0.925	0.094	0.059	0.005
Çek Cumhuriyeti	0.575	0.303	0.660	0.540	0.571	0.523	0.143	0.073	0.081
Almanya	1.000	1.000	0.864	1.000	0.913	1.000	1.000	1.000	1.000
Danimarka	0.764	0.555	0.670	0.803	0.492	0.505	0.035	0.044	0.065
İspanya	0.496	0.535	0.641	0.599	0.556	0.579	0.282	0.710	0.012
Estonya	0.441	0.187	0.097	0.197	0.103	0.654	0.019	0.012	0.003
Finlandiya	0.913	0.723	0.524	0.708	0.730	0.710	0.080	0.073	0.061
Fransa	0.677	0.723	0.650	0.664	0.714	0.813	0.412	0.214	0.838
Birleşik Krallık	0.890	0.852	0.777	0.832	0.802	0.888	0.210	0.484	0.029
Yunanistan	0.000	0.277	0.000	0.000	0.373	0.439	0.000	0.199	0.000
Macaristan	0.134	0.381	0.456	0.321	0.222	0.467	0.116	0.035	0.073
İrlanda	0.488	0.568	0.835	0.642	0.683	0.523	0.025	0.044	0.001
İzlanda	0.220	0.084	0.340	0.255	0.238	0.467	0.000	0.000	0.006
İsrail	0.512	0.387	0.398	0.504	0.476	0.832	0.001	0.139	0.001
İtalya	0.472	0.581	0.660	0.628	0.587	0.607	0.077	0.571	0.764
Litvanya	0.449	0.439	0.505	0.423	0.444	0.710	0.096	0.024	0.025
Letonya	0.205	0.226	0.301	0.277	0.238	0.224	0.066	0.021	0.002
Meksika	0.024	0.000	0.029	0.168	0.222	0.000	0.717	0.269	0.463
Norveç	0.567	0.684	0.631	0.577	0.556	0.364	0.004	0.047	0.001
Polonya	0.331	0.181	0.456	0.350	0.270	0.393	0.781	0.173	0.008
Portekiz	0.409	0.129	0.262	0.175	0.421	0.533	0.003	0.158	0.002
Slovak cumhuriyeti	0.339	0.226	0.427	0.153	0.000	0.402	0.097	0.029	0.033
Slovenya	0.024	0.194	0.126	0.212	0.119	0.084	0.014	0.063	0.000
İsveç	0.843	0.890	1.000	0.978	1.000	1.000	0.137	0.073	0.123
Türkiye	0.260	0.387	0.427	0.292	0.214	0.346	0.642	0.452	0.272

Tablo 9. Ağırlıklandırılmış Karar Matrisi

	A. Performans						B. Taşıma Hacimleri		
Kriterler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
OECD Ülkeleri	Kriter Değerleri								
Avusturya	0.063	0.257	0.108	0.491	0.192	0.113	0.206	0.114	0.054
Çek Cumhuriyeti	0.057	0.190	0.097	0.392	0.152	0.089	0.215	0.116	0.058
Almanya	0.073	0.291	0.109	0.510	0.185	0.117	0.377	0.216	0.108
Danimarka	0.064	0.226	0.098	0.459	0.145	0.088	0.195	0.112	0.057
İspanya	0.054	0.224	0.096	0.407	0.151	0.092	0.241	0.184	0.055
Estonya	0.052	0.173	0.064	0.305	0.107	0.097	0.192	0.109	0.054
Finlandiya	0.070	0.251	0.089	0.435	0.168	0.100	0.203	0.116	0.057
Fransa	0.061	0.251	0.097	0.424	0.166	0.106	0.266	0.131	0.099
Birleşik Krallık	0.069	0.270	0.104	0.467	0.174	0.110	0.228	0.160	0.055
Yunanistan	0.036	0.186	0.059	0.255	0.133	0.084	0.188	0.129	0.054
Macaristan	0.041	0.201	0.085	0.337	0.118	0.086	0.210	0.112	0.058
İrlanda	0.054	0.228	0.107	0.418	0.163	0.089	0.193	0.113	0.054
İzlanda	0.044	0.158	0.078	0.320	0.120	0.086	0.188	0.108	0.054
İsrail	0.055	0.202	0.082	0.383	0.143	0.107	0.189	0.123	0.054
İtalya	0.054	0.230	0.097	0.415	0.154	0.094	0.203	0.169	0.095
Litvanya	0.053	0.209	0.088	0.363	0.140	0.100	0.206	0.110	0.055
Letonya	0.044	0.178	0.076	0.325	0.120	0.072	0.201	0.110	0.054
Meksika	0.037	0.146	0.060	0.298	0.118	0.059	0.323	0.137	0.079
Norveç	0.057	0.245	0.095	0.402	0.151	0.080	0.189	0.113	0.054
Polonya	0.048	0.172	0.085	0.344	0.123	0.081	0.335	0.126	0.054
Portekiz	0.051	0.164	0.074	0.299	0.138	0.090	0.189	0.125	0.054
Slovak cumhuriyeti	0.049	0.178	0.083	0.294	0.097	0.082	0.207	0.111	0.056
Slovenya	0.037	0.174	0.066	0.309	0.108	0.063	0.191	0.115	0.054
İsveç	0.067	0.275	0.117	0.504	0.194	0.117	0.214	0.116	0.061
Türkiye	0.046	0.202	0.083	0.329	0.118	0.079	0.309	0.157	0.069

Tablo 10. Sınır Yakınlık Alanı Matrisi

	A. Performans						B. Taşıma Hacimleri		
Kriterler	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
BAA	0.053	0.208	0.087	0.373	0.141	0.090	0.221	0.127	0.061

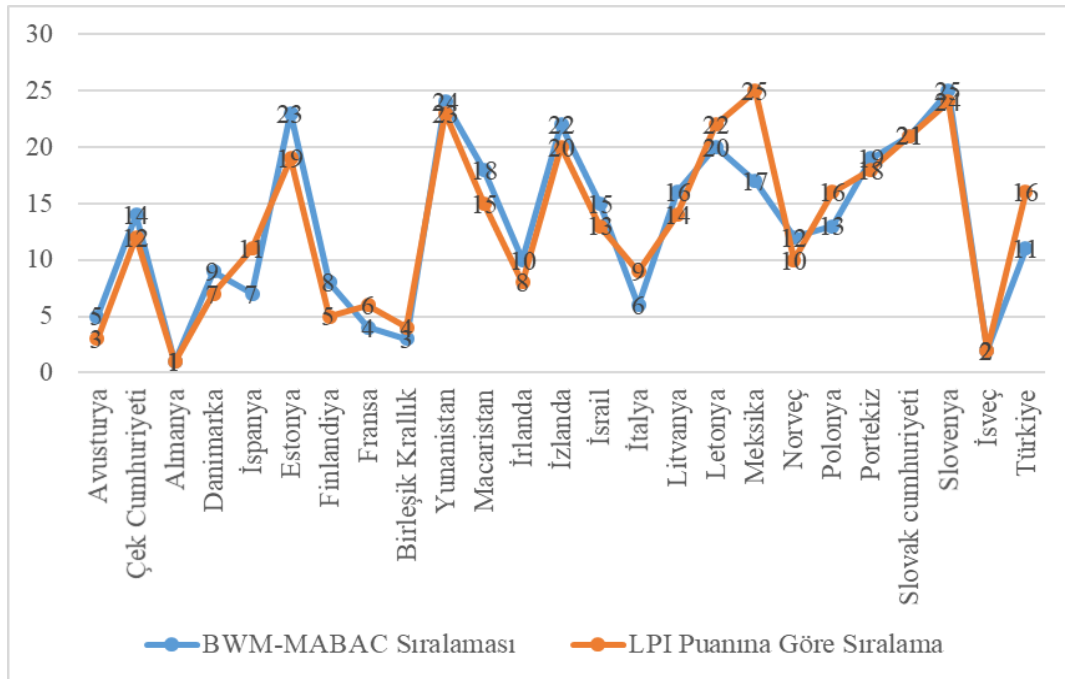
Tablo 11 Alternatiflerin Sınır Yakınlık Alanı Matrisine Uzaklıkları

Kriterler	A. Performans						B. Taşıma Hacimleri		
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3
OECD Ülkeleri	Kriter Değerleri								
Avusturya	0.011	0.050	0.022	0.118	0.052	0.023	-0.015	-0.013	-0.007
Çek Cumhuriyeti	0.005	-0.018	0.011	0.020	0.012	-0.001	-0.006	-0.011	-0.003
Almanya	0.020	0.084	0.023	0.137	0.045	0.027	0.155	0.089	0.047
Danimarka	0.012	0.019	0.011	0.087	0.004	-0.002	-0.026	-0.014	-0.003
İspanya	0.002	0.016	0.009	0.035	0.010	0.002	0.020	0.057	-0.006
Estonya	0.000	-0.035	-0.022	-0.068	-0.034	0.007	-0.030	-0.018	-0.007
Finlandiya	0.017	0.043	0.003	0.062	0.027	0.010	-0.018	-0.011	-0.004
Fransa	0.009	0.043	0.010	0.051	0.025	0.016	0.044	0.004	0.038
Birleşik Krallık	0.016	0.062	0.017	0.094	0.034	0.020	0.006	0.033	-0.005
Yunanistan	-0.016	-0.022	-0.028	-0.118	-0.008	-0.006	-0.033	0.002	-0.007
Macaristan	-0.011	-0.007	-0.001	-0.036	-0.022	-0.004	-0.011	-0.015	-0.003
İrlanda	0.002	0.021	0.021	0.046	0.022	-0.001	-0.028	-0.014	-0.007
İzlanda	-0.008	-0.050	-0.008	-0.053	-0.021	-0.004	-0.033	-0.019	-0.007
İsrail	0.002	-0.006	-0.005	0.010	0.002	0.017	-0.033	-0.004	-0.007
İtalya	0.001	0.022	0.011	0.042	0.013	0.004	-0.019	0.042	0.034
Litvanya	0.000	0.002	0.002	-0.010	-0.001	0.010	-0.015	-0.017	-0.006
Letonya	-0.009	-0.029	-0.010	-0.047	-0.021	-0.018	-0.021	-0.017	-0.007
Meksika	-0.015	-0.062	-0.026	-0.075	-0.022	-0.031	0.102	0.010	0.018
Norveç	0.004	0.038	0.009	0.029	0.010	-0.010	-0.032	-0.014	-0.007
Polonya	-0.004	-0.036	-0.001	-0.029	-0.018	-0.008	0.114	0.000	-0.006
Portekiz	-0.001	-0.043	-0.013	-0.073	-0.003	0.000	-0.033	-0.002	-0.007
Slovak cumhuriyeti	-0.004	-0.029	-0.003	-0.079	-0.044	-0.008	-0.015	-0.016	-0.005
Slovenya	-0.015	-0.034	-0.021	-0.064	-0.032	-0.027	-0.031	-0.012	-0.007
İsveç	0.015	0.068	0.030	0.131	0.053	0.027	-0.007	-0.011	0.000
Türkiye	-0.007	-0.006	-0.003	-0.044	-0.023	-0.011	0.088	0.030	0.008

BWM-MABAC ile elde edilen S_i değerleri ve sıralamaları Tablo 12' de verilmiştir. Sonuçları incelediğimizde LPI ve BWM-MABAC sıralamaları arasında 25 ülkeden 22' sinde farklılıklar vardır. 18 ülkenin sıralamaları arasında 1 ila 3 fark vardır. Türkiye' nin sıralaması 5 sıra farkla 16' dan 11' e ve Meksika' nın sıralaması 8 farkla 25' den 17' ye yükselmiştir.

Tablo 12. BWM-MABAC Sonuçları ve LPI ile karşılaştırması

OECD Ülkeleri	S _i	BWM-MABAC Sıralaması	LPI Puanı	LPI Puanına Göre Sıralama	Fark
Avusturya	0.24	5	4.105	3	2
Çek Cumhuriyeti	0.008	14	3.67	12	2
Almanya	0.626	1	4.237	1	0
Danimarka	0.086	9	3.817	7	2
İspanya	0.146	7	3.73	11	4
Estonya	-0.206	23	3.362	19	4
Finlandiya	0.13	8	3.932	5	3
Fransa	0.241	4	3.908	6	2
Birleşik Krallık	0.278	3	4.078	4	1
Yunanistan	-0.235	24	3.248	23	1
Macaristan	-0.111	18	3.428	15	3
İrlanda	0.061	10	3.797	8	2
İzlanda	-0.203	22	3.338	20	2
İsrail	-0.022	15	3.66	13	2
İtalya	0.152	6	3.758	9	3
Litvanya	-0.034	16	3.632	14	2
Letonya	-0.179	20	3.327	22	2
Meksika	-0.103	17	3.115	25	8
Norveç	0.027	12	3.738	10	2
Polonya	0.011	13	3.422	16	3
Portekiz	-0.175	19	3.408	18	1
Slovak cumhuriyeti	-0.202	21	3.33	21	0
Slovenya	-0.242	25	3.185	24	1
İsveç	0.305	2	4.212	2	0
Türkiye	0.032	11	3.422	16	5



Şekil 5. BWM-MABAC ve LPI karşılaştırması

4. SONUÇLAR

Ülkelerin lojistik rekabetçiliğinin değerlendirilmesi, ticaret engellerini iyileştirmek ve sınırlı yatırım kaynaklarına ilişkin öncelikli alanları belirlemek için gelecekteki projeler üzerinde olduğu kadar politika bileşenleri üzerinde de potansiyel bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, hem lojistik performans alanları hem de lojistik taşımacılık hacimleri dikkate alınarak ülkelerin lojistik rekabet güçlerini değerlendirmek için BWM-MABAC yöntemi uygulanmıştır. Puan ortalamalarını (LPI skorunda olduğu gibi) almak yerine, altı lojistik performans değerini (farklı önemi olan) ayrı ayrı değerlendirerek daha objektif bir bakış açısı geliştirilmiştir.

5. KAYNAKÇA

Chow, G., Heaver, T. D., & Henriksson, L. E. 1994 Logistics performance: definition and measurement. *International journal of physical distribution & logistics management*, 241, 17-28

Klumpp, M., Abidi, H., Bioly, S., Buchkremer, R., Ebener, S., & Sandhaus, G. 2017 Logistics Dynamics and Demographic Change. In *Dynamics in Logistics* pp. 347-362 Springer, Cham.

Kucukaltan, B., Irani, Z., & Aktas, E. 2016 A decision support model for identification and prioritization of key performance indicators in the logistics industry. *Computers in Human Behavior*, 65, 346-358

Ab Talib, M. S., Abdul Hamid, A. B., & Chin, T. A. 2016 Can halal certification influence logistics performance? *Journal of Islamic Marketing*, 74, 461-475

Khlie, K., Serrou, D., & Abouabdellah, A. 2016 October The impact of Lean-logistics and the information system on the information flow management within the healthcare supply chain. In *Intelligent Systems: Theories and Applications SITA, 2016 11th International Conference on* pp. 1-5 IEEE

Guner, S., & Coskun, E. 2012 Comparison of impacts of economic and social factors on countries' logistics performances: a study with 26 oecd countries. *Research in Logistics & Production*, 2, 330-343

Castrellón-Torres, J. P., Torres-Acosta, J. H., & Adarme-Jaimes, W. 2014 Model for the logistics distribution of medicines in the Colombian public health program. *Dyna*, 81187, 257-266

Abidi, H., de Leeuw, S., & Klumpp, M. 2014 Humanitarian supply chain performance management: a systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, 195/6, 592-608

Biswas, T., & Samanta, S. 2016 A strategic decision support system for logistics and supply chain network design. *Sādhanā*, 416, 583-588

Wong, D. W., Choy, K. L., Chow, H. K., & Lin, C. 2014 Assessing a cross-border logistics policy using a performance measurement system framework: the case of Hong Kong and the Pearl River Delta region. *International Journal of Systems Science*, 456, 1306-1320

Ambrosini, C., Routhier, J.L., 2004 Objectives, methods and results of surveys carried out in the field of urban freight transport: an international comparison. *Transp. Rev.* 24 (1), 57-77

"Gergin, R.E., Baki, B., 2015 Evaluation by integrated AHP and TOPSIS method of logistics performance in Turkey's regions. *Bus. Econ. Res. J.* 6 (4), 115-135 (in Turkish)."

Yang, Y. C., & Chen, S. L. 2016 Determinants of global logistics hub ports: Comparison of the port development policies of Taiwan, Korea, and Japan. *Transport Policy*, 45, 179-189

Özceylan, E., Çetinkaya, C., Erbaş, M., & Kabak, M. 2016 Logistic performance evaluation of provinces in Turkey: A GIS-based multi-criteria decision analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 323-337

Wanke, P., Azad, M. A. K., & Barros, C. P. 2016 Efficiency factors in OECD banks: A ten-year analysis. *Expert Systems with Applications*, 64, 208-227

Zaman, M. R., Morid, S., & Delavar, M. 2016 Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems*, 147, 98-110

Kazan, H., Karaman, E., Akçalı, B. Y., & Şişmanoğlu, E. 2015 Assessment of teog examination success: topsis multi-criteria decision-making method practice. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 915-924

Rashidi, K., Shabani, A., & Saen, R. F. 2015 Using data envelopment analysis for estimating energy saving and undesirable output abatement: a case study in the Organization for Economic Co-Operation and Development OECD countries. *Journal of cleaner production*, 105, 241-252

Mavi, R. K., Saen, R. F., & Goh, M. 2018 Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach. *Technological Forecasting and Social Change*

Zhou, P., Poh, K. L., & Ang, B. W. 2007 A non-radial DEA approach to measuring environmental performance. *European journal of operational research*, 1781, 1-9

Kou, M., Chen, K., Wang, S., & Shao, Y. 2016 Measuring efficiencies of multi-period and multi-division systems associated with DEA: An application to OECD countries' national innovation systems. *Expert Systems with Applications*, 46, 494-510

Yu, M., Hsiao, B., 2015 Measuring the technology gap and logistics performance of individual countries by using a meta-DEA-AR model. *Maritime Policy Manage.* 43 (1), 98-120

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.

Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019). The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*.

Rezaei, J., van Roekel, W. S., & Tavasszy, L. (2018). Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method. *Transport Policy*, 68, 158-169.

Pamucar, D., Chatterjee, K., & Zavadskas, E. K. (2019). Assessment of third-party logistics provider using multi-criteria decision-making approach based on interval rough numbers. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 383-407.

Pamučar, D., & Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). *Expert systems with applications*, 42(6), 3016-3028.

Haughwout, A. F. 2001 Infrastructure and social welfare in metropolitan America. *Economic Policy Review* 73: 43-54

Ojala, L., & Celebi, D. 2015 February The World Bank's Logistics Performance Index LPI and drivers of logistics performance. In document préparé pour la Table ronde du Forum international des transports sur les stratégies de développement logistique et leurs indicateurs de résultats 9-10 mars 2015, Queretaro, Mexique

Saidi, S., & Hammami, S. 2011 May The role of transport and logistics to attract foreign direct investment in the developing countries. In *Logistics (LOGISTIQUA)*, 2011 4th International Conference on (pp. 484-489). IEEE

Ozmen, M. (2019). Logistics competitiveness of OECD countries using an improved TODIM method. *Sādhanā*, 44(5), 108.

LOJİSTİK REKABET GÜCÜNÜN BWM-MABAC YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Website:<https://lpi.worldbank.org/>

OECD 2018, "Freight transport" indicator, <https://doi.org/10.1787/708eda32-en> accessed on 03 July 2018

OECD 2018, Container transport indicator doi: 10.1787/26de63f3-en Accessed on 04 July 2018

OECD 2018, Passenger transport indicator doi: 10.1787/463da4d1-en Accessed on 04 July 2018

Martí, L., Martín, J. C., & Puertas, R. 2017 A DEA-LOGISTICS PERFORMANCE INDEX. *Journal of Applied Economics*, 20(1)

Çakır, S. 2017 Measuring logistics performance of OECD countries via fuzzy linear regression. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 24(3-4), 177-186

Jiang, C., Chen, D., 2009 Research on urban logistics infrastructure: an empirical study of China. *J. Serv. Sci. Manage.* 2, 80-91

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

Müge Ensari Özay *, Nisanur Odacı, Rüştü Uçan

* Üsküdar Üniversitesi, Üsküdar, İstanbul

muge.ensariozay@uskudar.edu.tri

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

İş sağlığı ve güvenliğinde en önemli konulardan biri çalışmaların sağlıklı ve güvenli ortamlarda yapılmasıdır. Çünkü eğitimin, sağlıklı ve güvenli bir işyeri açısından yaşamsal önemi vardır. Bilinç ve duyarlılığın artırılmasında, güvenlik kültürünün yerleştirilmesinde ve İSG politikalarının uygulanmasını kolaylaştırmada etkin bir role sahiptir. Aynı zamanda eğitim işyerindeki tehlikelerden korunmak için dünyada kabul görülen proaktif yaklaşımın en önemli basamağını oluşturmaktadır (Ekemen, 2006). Uluslararası Çalışma Örgütü'ne göre iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili sorunların ortadan kaldırılması, yeterli sağlık ve güvenlik düzeyine ulaşılması amacıyla bütün çalışanların ileri düzeyde motivasyonunun sağlandığı yeterli eğitimler verilmelidir. Bu eğitimlerinin temel yapı taşı çalışanlarda güvenli davranışlar ve iş güvenliği kültürünü oluşturmaktır. Kültür toplumda ortak bir paylaşım olarak ifade edildiği için işverence sağlanan eğitimler ancak çalışanlara doğru uygulandığı takdirde doğru sonuçlar doğurmaktadır (Burke, Sarpy, Smith-Crowe, Chan-Serafin, Salvador ve Islam, 2006; Çiftçi, 2016).

Ülkemizdeki mevzuat açısından baktığımızda da iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin çok önemli bir yer aldığını görmekteyiz. İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na (2012) göre tüm işyerlerinde iş güvenliği uzmanı bulundurulması zorunlu hale gelmiştir. İş Güvenliği Uzmanlarının Görev, Yetki, Sorumluluk Ve Eğitimleri Hakkında Yönetmeliğe (2012) göre ise iş güvenliği uzmanlarının görevlerinden biri eğitim ve bilgilendirmedir. Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmeliğe (2013) göre iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin amacı iş yerlerinde hem sağlıklı hem de güvenli bir çalışma ortamı oluşturmak, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önlemek, çalışanları kendi hak ve sorumlulukları konusunda bilgi sahibi yapmak, çalışanlara karşılaşılabilecekleri risklerle ilgili bilgi vermek ile bu karşılaştığı riskler hakkında uyulması gereken tedbirleri öğretmek ve onlarda iş sağlığı ve güvenliği bilinci oluşturmaktır.

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nu (2012) takiben üniversitelerin sağlık hizmetleri meslek yüksekokullarında ve sağlık bilimleri fakültelerinde uzman yetiştirmek için iş sağlığı ve güvenliği bölümleri açılmıştır. Üniversitelerde yetiştirilecek olan uzmanların iş yaşantılarında çalışanlarına uygun eğitimi verebilmeleri için öncelikle kendilerinin yeterli ve kaliteli eğitimi almaları gerekmektedir. Bu yeterli eğitimler kapsamında günümüzün enstrümanlarından bir tanesi sanal gerçeklik teknolojisidir (Lucas ve Thabet, 2008; Manca, Brambilla ve Colombo, 2013).

Bu araştırmada üniversitelerde iş sağlığı ve güvenliği bölümünde okuyan öğrencilerin teorik olarak aldıkları eğitimlerin yanı sıra derslerin uygulamalı eğitimler ile desteklenerek öğrencilerde daha anlaşılır ve kalıcı bilgiler oluşturulması ele alınmıştır. Çalışmanın amacı iş sağlığı ve güvenliği öğrencilerinde teorik derslere ek olarak, uygulamalı derslerde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanımını sağlayarak öğrencilerde öğrenmenin ve bilgi kalıcılığının artabileceğini göstermektir.

2. SANAL GERÇEKLİK

2.1. Sanal Gerçeklik Nedir?

Sanal gerçeklik sistemi, gerçek dünya ile ilgili ortamların, bilgisayar tarafından üç boyutlu benzerlik ile oluşturulduğu, kullanıcıların ise bu benzerlik içerisine giyilebilir teknoloji ile girdiği, duygusal olarak bağ kurduğu sistemlerdir (Eschenbrenner, Nah ve Siau, 2008). Bu çerçeveden bakıldığında sanal gerçeklik teknolojisi, kullanıcılarına bilgisayar tarafından oluşturulan yapay dünyaya girebilme, orada çeşitli tecrübeler kazanma ve orayı kendilerine göre yönlendirebilme olanağı sağlar (Deryakulu, 1999).

Sanal gerçeklik, kullanıcının gerçek olarak değil de zihinsel olarak gerçek ortamdan ayrılıp üç boyutlu oluşturulan sanal dünyanın içerisine girdiği, orada yer aldığı, dolaştığı ve nesnelere etkileşime girdiği ve geri dönüşüm tepkileri aldığı ortamlardır. (Kayapa, 2010). Sanal gerçeklik, bilgisayar ortamında gerçek dünyanın taklidi olarak tasarlanmış ve kullanıcıya gerçek dünyadaymış hissiyatı veren, tasarlanan sanal dünya ile kullanıcı arasında etkileşim sağlayan teknolojik programdır (Bayraktar ve Kaleli, 2007). Sanal gerçeklik gerçek dünyanın, belirlenmiş bir takım kurallar ve yazılımlarla bilgisayar ortamında oluşturulmuş yapay halidir. Oluşturulan bu yapay ortamda kullanıcılar gerçek dünyadakine benzer olarak, verdikleri tepkilere karşılık alabilmektedirler. Böylelikle gerçek dünyaya benzer deneyimler yapay oluşturulan ortamlarda yaşanabilmektedir (Zhao ve Lucas, 2015; Aktamış ve Arıcı, 2013).

Sanal gerçeklik eski dönemlerde yalnızca uzay araştırması konularında kullanılırken günümüzde neredeyse tüm alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Sürücüler için alkol kullanımının analizi, doktor ve cerrahların eğitimi, fobisi olanların tedavisi arkeolojik çalışmalar, eğitim ve iş güvenliği gibi birçok alanda artık kullanılmaktadır (Yamamoto, Zümrüt ve Altun, 2018).

2.2. Sanal Gerçekliğin Tarihsel Gelişimi

Sanal gerçeklik kavramı ilk olarak 20.yy'ın ikinci yarısında ortaya çıkmıştır. Heiling tarafından 1960-1962 yılları arasında Sensorama adında çok sensörlü simülasyon ortama çıkarılmıştır (Başaran, 2010). Ses, rüzgâr sesi, koku ve titreşim aracılığıyla bir film geliştirilmiştir ve bu sanal gerçeklik için ortaya çıkan ilk yaklaşımdır.

Bu gelişmelerden sonra yeni uygulamalar hızla ortaya çıkmaya başlamıştır (Cha, Han, Lee ve Choi, 2012; Lewis, Aggarwal, Rajaretnam, Grantcharov ve Darzi, 2011). Bilim adamları sanal gerçeklikle ilgili, bilgisayarın insanlarla etkileşim yeteneğinin farkına varınca araştırmalarını arttırmışlardır. Geçtiğimiz yüzyılda, toplumun geniş bir kesimi bu yapay dünyayı bilgisayar oyunları ile tanımaya başlamıştır.

1929 yılında Edward Link tarafından pilotların eğitilmesi amacıyla uçuş simülasyonu tasarlanmıştır.

1946 yılında Amerikan ordusu için Pensilvanya Üniversitesinde ilk dijital bilgisayar geliştirilmiştir.

1956 yılında Morton Heilig tarafından tek kişilik, koku, rüzgâr, titreşim, ses ve görüntü efekti veren Sensorama geliştirilmiştir.

1963 yılında MIT öğrencisi Ivan Sutherland tarafından interaktif bilgisayar tabanlı Sketchpad geliştirilmiştir.

1968 yılında Ivan Sutherland ve David Evans tarafından Evans and Sutherland Corp kurulmuştur ve Sutherland tarafından stereoskopik HMD tasarlanmıştır.

1971 yılında İngiliz Redifon şirketinin uçuş simülasyonları üretilmiştir.

1972 yılında Atari tarafından çok oyunculu video oyunu Pong tasarlanmıştır.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

1979 yılında Eric Howlett tarafından geliştirilen sonrasında da NASA’da kullanılabilecek LEEP görüntü sistemi geliştirilmiştir.

1983 yılında Mark Callahan tarafından Sutherland’in çalışması dışındaki ilk HMD projesi geliştirilmiştir.

1984 yılında William Gibson “Neuromancer” romanıyla Cyberspace (Siberuzay) kavramını duyurmuştur.

1990 yılında doktorasını Stanford Üniversitesinde yapan Jim Kramer “Virtual Technologies” şirketini kurmuştur ve CyberGlove isimli bir eldiveni piyasaya sürmüştür.

1991 yılında SIGGRAPH bilgisayar grafikleri konferansı sanal ortam tanıtımı yapmıştır.

1992 yılında SIGGRAPH’92 konferansında Illinois Üniversitesi’nin geliştirdiği The CAVE tanıtılmıştır.

1994 yılında SIGGRAPH konferansında GMD tarafından Responsive Workbench tanıtılmıştır.

1995 yılında tek ekranlı sanal gerçeklik (VR) sistemi olan ImmersaDesk’i tanıtılmıştır.

1997 yılında Virtual Technologies şirketi el hareketlerine geribildirim yapan Cyber Grasp tanıtılmıştır.

1999 yılında Washington Üniversitesi, ortak olan HITLab ve ATR Media şirketleri tarafından tasarlanan ücretsiz olan ARToolKit piyasaya sunulmuştur.

2000 yılında Kuzey Amerika’da Şehir Üniversitesi tarafından ilk 6 yüzlü CAVE Iowa kurulmuştur (Sürücü, 2017).

2.3. Sanal Gerçeklik Türleri ve Sistemleri

Sanal gerçeklik; sürükleyici gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve masaüstü sanal gerçeklik olmak üzere üç türe ve tamamen sürükleyici sistemler, yarı sürükleyici sistemler, sürükleyici olmayan sistemler olmak üzere üç sisteme sahiptir (Kale, 2010).

Sanal Gerçeklik sistemlerinin dört temel unsuru vardır: a) Sanal bir dünya, b) Olayın içine dalma durumu, c) Duyusal geribildirim (kullanıcı girdilerine yanıt verme), d) Etkileşim. Bu unsurlara ek olarak sanal gerçeklik sisteminin bileşenleri olarak şu şekilde gruplandırılır: a) Bilgisayarın donanımı ve yazılımı, b) Girdilerin ve çıktılarının aygıtları, c) Sanal dünyanın oluşturulması için veriler (Sürücü, 2017).

Sürükleyici Gerçeklik (Immersive Virtual Reality): Sürükleyici sanal gerçeklikte simülasyonların oluşturulması için sabit ara yüzler ve bununla birlikte yanıtıcı uzay laboratuvarlarında bulunan BOOM görüntüleyicisi kullanılır. BOOM görüntüleyicisi kullanıcıların başı üzerine değil önlerine takılmaktadır. Başa takılmadığı için de kullanıcılara ağır gelmemekte ve kullanıcıları yormamaktadır. Üç boyutlu sanal gerçeklikte kullanıcı görüntünün içine konumlandırılır ve oluşturulan görüntü kullanıcılarda görsel ve işitsel algıyı harekete geçirerek gerçekmiş hissiyatı yaratır (Başaran, 2010).

Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality): Sanal gerçekliğin diğer türü artırılmış gerçekliktir. Artırılmış gerçeklik; “Simülasyonu yapılmış uzantılarla operatöre sağlanmış artırılan doğal geri beslemedir.” Bu sistemde gerçek ve sanal dünyaya ait görüntü katmanları birleştirilmektedir böylece kullanıcıların hem sanal hem de gerçek dünya ile etkileşime geçmesine olanak sağlanmaktadır. Yani kullanıcılar gerçek bir oda ortamında oluşturulmuş sanal dünyanın içerisinde yer almaktadır (Sürücü, 2017).

Masaüstü Sanal Gerçekliği (Desktop Virtual Reality): Masaüstü sanal gerçeklik teknolojisinde kullanıcılar sanal dünyayı bilgisayar ekranından görmekte ve fare gibi aygıtlar ile bu sanal dünyayı yönlendirmektedirler. Sanal gerçeklik türlerinden masaüstü sanal gerçeklik kullanımı en kolay olanıdır ve diğer türlere göre maliyeti en az olanıdır. Masaüstü sanal gerçekliğin en ciddi

dezavantajı kullanıcıya sanal dünyanın içinde olma hissi vermemesidir. Bu yüzden kullanıcılar odaklanma ve öğrenme problemleri ile karşı karşıya gelmektedir (Zafer, 2007).

Tamamen Sürükleyici Sistemler (Fully-Immersive Systems): Kullanıcıların görüş alanlarını tamamen saran bir sistemdir. Kullanıcılar HDM gibi başlıklar kullanarak gerçek dünyadan tamamen izole edilir. Kullanıcıların; ortamdaki gerçek veya gerçek olmayan sesler ile ya da kulaklıkla gerçek dünyadaki sesleri duymaları engellenir (Topuz, 2018).

Yarı Sürükleyici Sistemler (Semi-Immersive Systems): Projeksiyon gibi büyük ekranlara görüntü yansıtılarak oluşturulan sanal ortamlardır. Yarı sürükleyici sistemde kullanıcılar, yansıtılan sanal dünyanın yer aldığı kübik odalarda yer alırlar. Kullanıcılar tamamen sanal ortamın içerisinde hissetmezler. Bu sistem çoğunluklu olarak, sürüş eğitimlerinde kullanılmaktadır (Topuz, 2018).

Sürükleyici Olmayan Sistemler (Non-Immersive Systems): Sanal gerçeklikte masaüstü tabanlı sistem olarak tanımlanmaktadır. Sanal ortam bilgisayar ekranına yansıtılır ve kullanıcılar neredeyse sanal ortamın hiç içinde hissetmezler. Ancak bu sistem diğer iki türe göre maliyet açısından daha ucuzdur. Ucuz olmasından dolayı sanal gerçeklik sistemlerinin tanınması ve yaygınlaşmasında büyük ölçüde katkı sağlamıştır. (Topuz, 2018).

2.4. Sanal Gerçekliğin Eğitimdeki Yeri ve Önemi

Sanal gerçeklik teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişim ile birlikte oluşan yaygınlaşma sonucunda sanal gerçekliğe eğitim alanındaki ilgi artmıştır. Bu konuda yapılmış olan araştırmalar da sanal gerçekliğin eğitim hayatı için büyük avantajlar oluşturduğunu gösterir niteliktedir (Bütün, Budak, Selçuk, Emre ve Şimşek, 2019). Sanal gerçeklik ortamlarının etkileşim, ışık ve ses özelliği öğrencilerin beş duyu organlarını harekete geçirmektedir (Aktamış ve Arıcı, 2013). Teknolojik bir eğitim olan sanal gerçeklik uygulaması, öğrenciler için simülasyon olarak oluşturulmuş bir çalışma ortamında hareket etmelerini sağlamak ve dersi anlamaları için güçlü bir sistem oluşturmaktadır (Bütün vd., 2019).

Öğrenmenin somutlaşabilmesi için öğrencinin senaryo içerisinde insanlar veya ekipmanlar ile etkileşime girmesi veyahut çeşitli davranışlarda bulunması gerekmektedir (Özdemir, Erbaş ve Yucesoy, 2019). Sanal gerçeklik öğrencilerde pasif gerçekleştirilen gözlemler yerine, birincil şahıs olarak aktif bir şekilde katılabildikleri bir eğitim ve deneyimlediklerini öğrenebilme imkânı sunmaktadır (Özdemir, Erbaş vd., 2019).

Günümüzdeki sınıflar ile sanal sınıf ortamlarının birbirleriyle karşılaştırılması üzerine, öğrencilerin sanal sınıf ortamında aitlik hissiyatının daha yüksek olduğu görülmektedir. Sanal sınıf ortamında çalışmanın öğrencilerde motive edici bir etkisi bulunmaktadır. Aynı zamanda sanal sınıflarda eğitim görmüş olan öğrencilerin akademik başarıları günümüzdeki sınıf ortamına kıyasla daha yüksektir ve öğrenilen bilgiler daha kalıcıdır. Sanal gerçekliğin öğretim hayatında kullanılması artık bir ihtiyaç haline gelmiştir. Öğrencilerin çalışma ortamlarında etkin olarak rol oynaması, üretkenliklerinde artı yönde ilerlemeler görülmesi, hayal gücünün gelişmesi ve olayları gerçekçi bir yaklaşım ile görmeleri derse ve bununla birlikte ileriye yönelik olumlu bir tutum sağlamaktadır. (Öngöz, Karal, Tüysüz, Yıldız ve Kılıç, 2017).

Sanal gerçeklik teknolojisi, öğrencilerin fiziksel ortamlara katılımını sağlamak ve onların bu ortamda öğrenmelerini kolaylaştırmak amacıyla, gerçek dünyadaki varlıklar ve sanal dünyadaki varlıkların birleşimine imkân sağlar (Özdemir, 2016). Öğretim hayatındaki bazı uygulamalar güvenli ve ekonomik olmamaktadır. Özellikle mekanik sistemlerde ve tehlikeli bir yerde çalışılacaksa, gerçek ortamı temsil edecek yapay ortamlara ihtiyaç duyulacaktır. Bu yapay ortamları sanal olarak oluşturmak, güvenlik bakımından ve ekonomik açıdan fayda sağlayacaktır (Arıcı, 2013).

Eğitim hayatında sanal gerçekliğin kullanımının birçok önemli avantajları bulunmaktadır. Bilgiye ulaşma veya keşfedilme imkânı olmayan yerleri inceleme, çalışılması mümkün olmayan veya tehlikeli olan yerlerde zarar görmeden çalışabilme ve soyut kavramlara ulaşarak öğrenimin kolaylaştırılması bu avantajların bazılarıdır (Arıcı, 2013). Rothbaum, Anderson, Zimand, Hodges,

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

Lang ve Wilson tarafından 2006 yılında uçma fobisine sahip kişilerin eğitimleri için sanal gerçeklik uygulaması tasarlanmış ve fobisi olan kişilere bu tasarlanan uygulamayla eğitim verilmiştir.

Çalışma sonlandığında ise sanal gerçeklik teknolojisiyle eğitim alan gruptaki kişilerin normal eğitim alan kişilere göre fobilerini yenme konusunda ilerleme kaydettikleri görülmüştür. Bu teknolojinin eğitim alanındaki önemi aşikârdır (Topuz, 2018). Sanal gerçeklik uygulamalarının eğitim alanında sağladığı avantajlardan en önemlileri şu şekilde sıralanmaktadır;

- Motivasyonu arttırmaktadır,
- Kişiyi dış etkenlerden soyutlayıp asıl konuya odaklamaktadır,
- Öğrencilerin dersi anlamları için güçlü bir ortam sağlamaktadır,
- Öğrencilerin derse aktif katılımını sağlamaktadır.

Goldman Sachs raporu 2016 yılında yayınlandığında, 2025 yılına kadar olan sürede tüm okullarda ve üniversitelerde eğitim için 15 milyon sanal gerçeklik gözlüğünün kullanılacağı tahmin edildiğine yer verilmiştir. (Yamamoto vd., 2018). Eğitim alanı için sanal gerçekliğin kullanılması eğitim ve öğretim hayatı için umut vaat eden bir teknolojidir.

2.5. İş Güvenliğinde Sanal Gerçeklik Uygulamaları

Sanal gerçeklik teknolojisi, eğitim ve öğretim hayatının yanı sıra iş sağlığı ve güvenliği alanında da devrim sayılabilecek eşsiz bir fırsat kazandırmaktadır (yaratmaktadır). Bu eğitimde insan beyni, oluşturulan yapay ortamı tıpkı gerçekmiş gibi algılar. Kullanıcının tehlikeli bir durumla karşılaştığında bu ortamı erken sonlandırabileceğini bilmesi de kullanıcı için büyük bir fayda sağlamaktadır. (Yamamoto vd., 2018). Sanal gerçeklikle oluşturulan yapay dünya, gerçek dünyadaki büyük makineleri, kullanmak ve taşımak gibi zor, tehlikeli ve maliyetli olabilecek çalışmaların daha düşük maliyet ile ve tehlikesiz bir şekilde uygulanabilmesine imkân vermektedir (Tucker, 2015). İş güvenliğinde sanal gerçeklik, kullanıcıların hayal gücünü geliştirmektedir. Etkili olan bu teknoloji ile öğrencilerin motivasyonu da artmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar sonucunda öğrencilerin sanal gerçeklik ortamında yapılan eğitimi dikkat çekici bulduğu gözlemlenmiştir (Başaran, 2010).

Sanal gerçeklik teknolojisiyle yapılan iş sağlığı ve iş güvenliği eğitimine örnek olarak, 25 adet farklı felaket senaryosunun yer aldığı tehlike simülatorü geliştirilmiştir. Simülasyonda iş makinesi ya da kamyon kullanımı esnasında gerçekleşme ihtimalinin bulunduğu kaza örneklemeleri kullanıcılara deneyimletilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda eğitim maliyetinin ve maddi zararların ciddi derecede azaldığı görülmüştür. Abdel-Wahab, benzer avantajları “Yeraltı Hizmetlerinde Tehlikeden Kaçınmak” projesinde anlatmaktadır. (Kızıl ve Joy, 2018).

Davranış değişikliği için herhangi bir konuda yalnızca bilgi edinmek yeterli değildir. Özellikle bir tehlike sırasında edinilen bilginin davranışa dönüşmesi için bilginin öğrenen kişi tarafından algılanması, deneyim yolu ile pekiştirilmesi ve kalıcı olarak hafızaya kaydedilmesi gerekmektedir (Yamamoto vd., 2018). İş güvenliği öğrencilerine tehlikeli alanlar kapsamında uygulamalı eğitimlerin verilmesi bir hayli zor bir davranıştır. Öğrencilerin yüksekte çalışma ile ilgili tehlikeleri anlaşılır bir şekilde öğrenmeleri için teorik eğitimin yanı sıra uygulamalı eğitim olarak verilmelidir. Ancak bir uygulamalı eğitim kapsamında öğrencileri yükseğe çıkarmak ve tehlikeleri göstermeye çalışmak risklidir. Açık alev yasağının olduğu bir işyerinde çakmak kullanımının tehlikeli bir davranış olduğu öğrencilere anlatılabilir fakat bu deneyimlenmeden tehlike için gerçek bir farkındalık oluşturulamayabilir. Bu deneyimi öğrencilerin hayatını riske atmadan canlandırmak zor bir uygulamadır. Çift el butonu bulunan bir pres makinesiyle çalışırken hız kazanmak amacıyla butonlardan birinin iptal edilmesinin çalışanlarda yaralanma riski oluşturduğu öğrencilere anlatıldığında öğrenciler tarafından yaralanmanın ciddiyeti fark edilmeyebilir. Bu çalışmanın uygulamalı olarak öğrencilere gösterilmesi zor bir çalışmadır. Tüm bu gerçekleştirilmesi zor ve tehlikeli olan uygulamalı çalışmaların sanal gerçeklik teknolojisi ile gerçekleştirilmesi mümkün bir çalışmadır. Öğrenciler hiçbir tehlikeye maruz kalmadan o çalışmalarını deneyimleyebilmektedir.

3. GEREÇ YÖNTEM

Araştırmanın Evreni: Araştırmanın evrenini İstanbul ilindeki üniversitelerin iş sağlığı ve güvenliği bölümlerinde okuyan öğrenciler oluşturmuştur. İstanbul'un Üsküdar ilçesindeki bir üniversitenin Sağlık Bilimleri Fakültesi, iş sağlığı ve güvenliği bölümü 3.sınıfında okuyan 23 öğrenci örneklem olarak seçilmiştir.

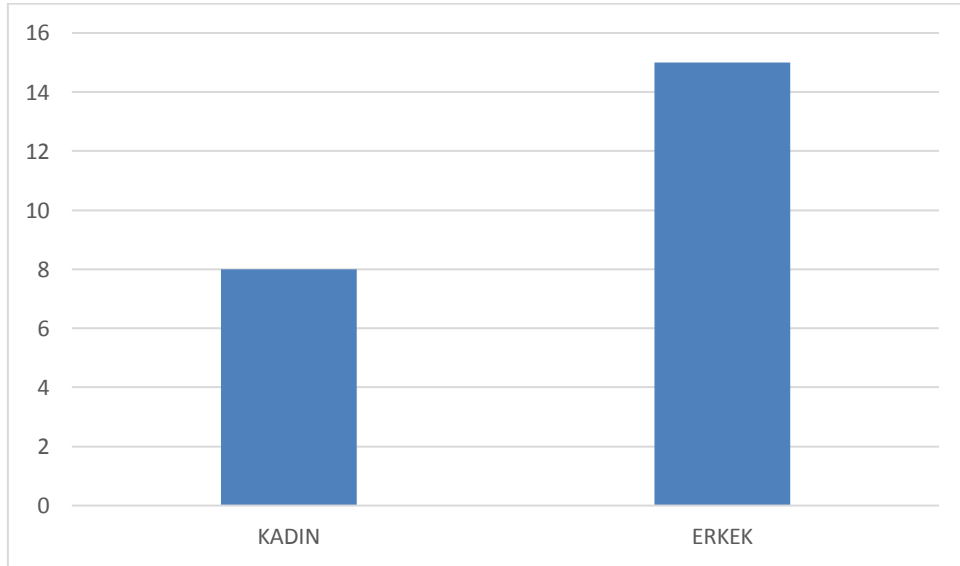
Araştırmanın Yöntemi: İş sağlığı ve güvenliği öğrencilerine iş güvenliği ve sanal gerçeklik gözlüğü üzerine 15 soruluk bir ön test uygulaması yapılmıştır. Ön test sonrası 14.09.2019 tarihinde öğrencilere sanal gerçeklik gözlüğü kullanılarak yüksekte çalışma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sanal gerçeklik deneyimi sonrasında ilk 15 sorusu ön test ile aynı olan 35 soruluk bir son test yapılmıştır. Son olarak ön test ve son test karşılaştırılarak sanal gerçeklik uygulamalarının iş sağlığı ve güvenliği öğrencileri üzerindeki etkileri grafiklere dökülmüştür.

Araştırmanın Zamanı: Çalışma kapsamında yapılacak olan ön testler öğrencilere 09.05.2019 tarihinde yaptırılmıştır. Ön test sonrasında 14.09.2019 tarihinde öğrencilere sanal gerçeklik gözlüğü kullanılmıştır. Gözlük kullanımını takriben son testler 14.09.2019 tarihinde yaptırılmıştır.

Araştırmanın Yapılacağı Yer: Öğrenciler için uygulama İstanbul ilinde, Acıbadem ilçesinde bulunan bir telekom firmasının bölge müdürlüğünde gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında kullanılan modelleme sanal gerçeklik gözlüğü olmuştur. Uygulamada öğrencilerin kendisini bizzat içerisinde hissedeceği sanal işyerlerini barındıran gözlüklerde öğrenciler için tehlikeden uzak bir o kadar da gerçek yüksekte çalışma gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

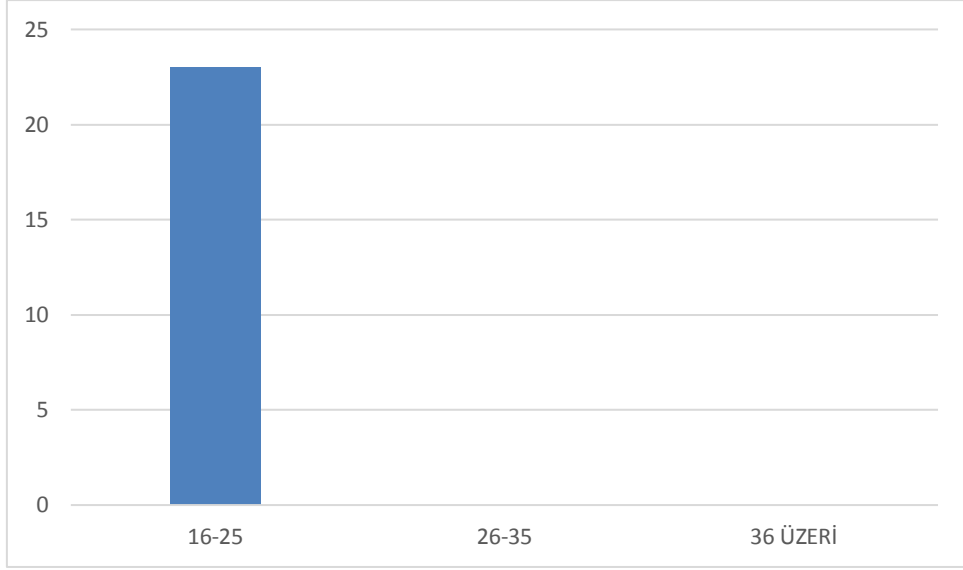
Öğrencilere yapılan ön test ile görüşleri alınıp uygulamalı eğitim için sanal gerçeklik gözlüğünde yüksekte çalışma yaptırılmıştır. Eğitim sonrasında son test yapılmıştır. Ön ve son testin yüzde oranları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 1: Teste katılan öğrencilerin cinsiyet dağılımları

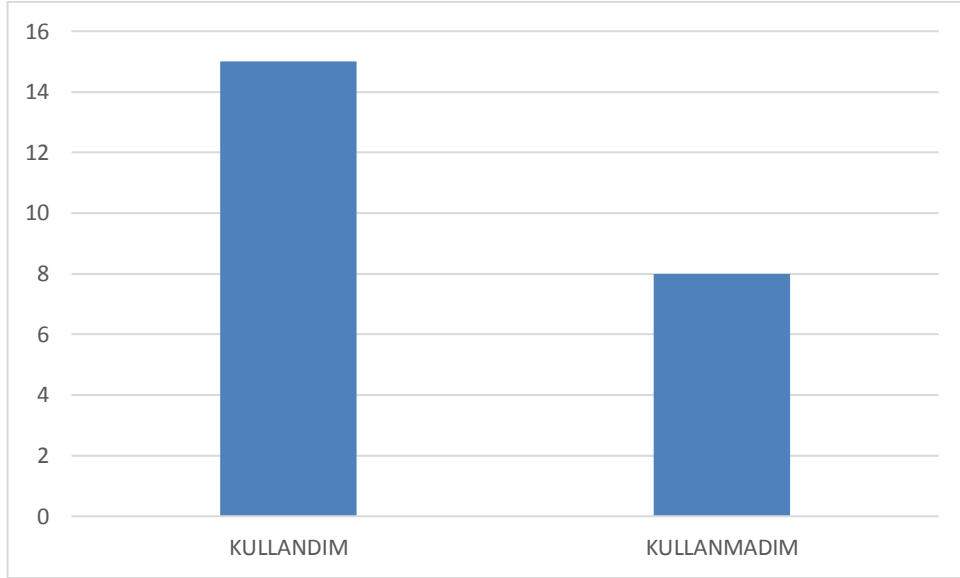
Şekil 1'de ön ve son teste katılan 23 öğrenciden 8'inin kadınlardan, 15'inin erkeklerden oluştuğu gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



Şekil 2: Teste katılan öğrencilerin yaş aralıkları

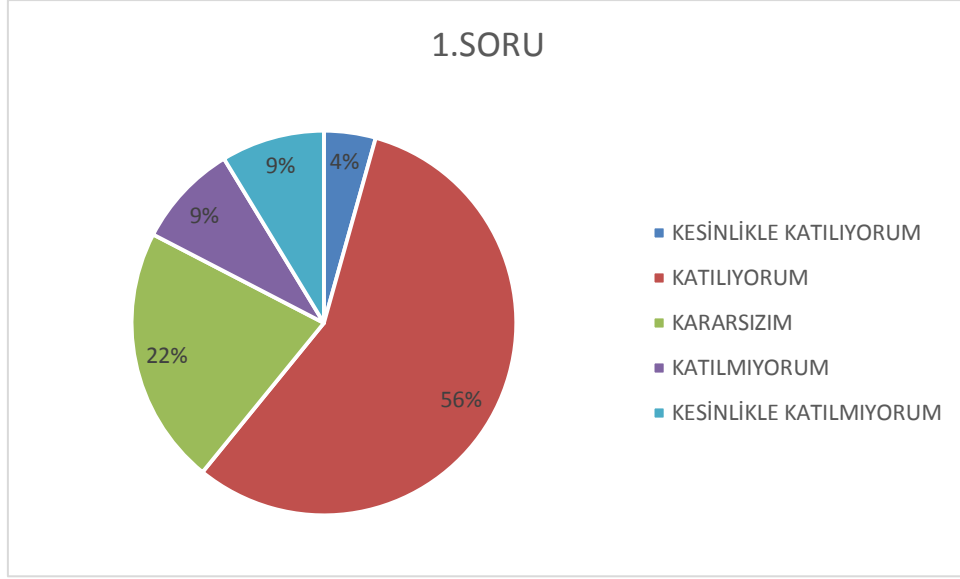
Şekil 2’de ön ve son teste katılan 23 öğrencinin tamamı 16 ila 25 yaş aralığında olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3: Daha önce sanal gerçeklik uygulaması kullanan öğrencilerin dağılımı

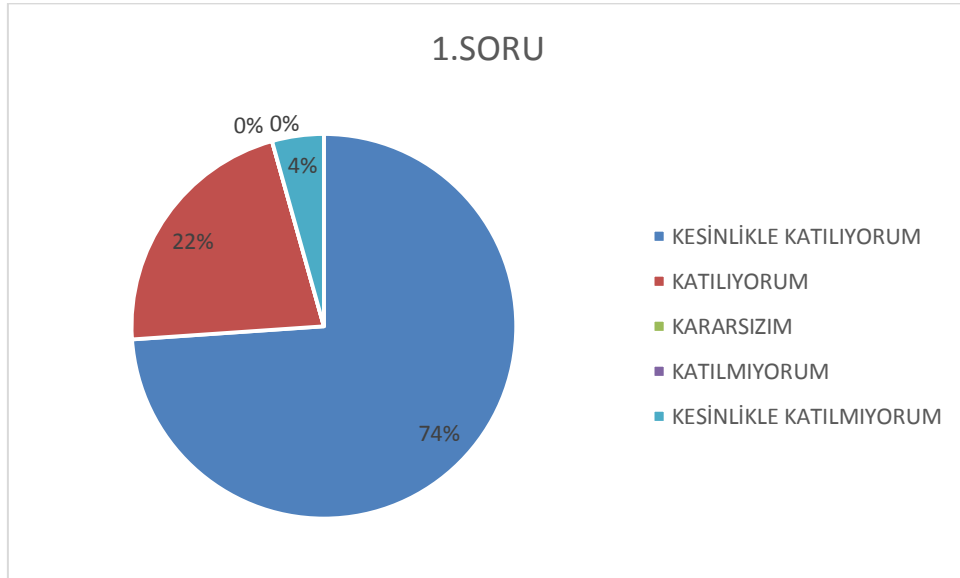
Şekil 3’te uygulama öncesinde 23 öğrencinin 15’inin daha önceden sanal gerçeklik uygulaması kullandığı, öğrencilerden 8 tanesinin ilk defa deneyimleyeceği gösterilmiştir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



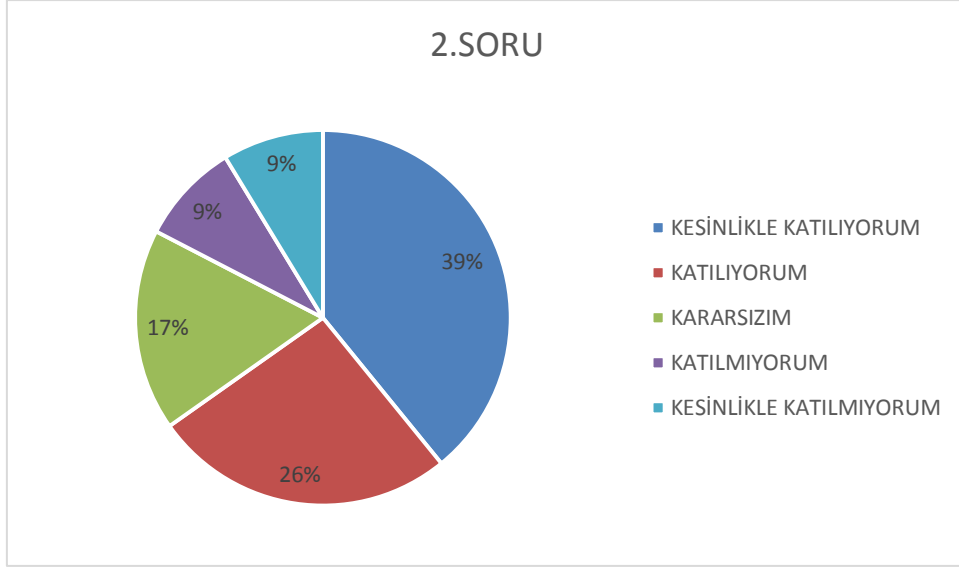
Şekil 4: Öğrencilerin ön testteki 1. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 4'te, ön testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa daha güvenli çalışma ortamları oluşacaktır” maddesine öğrencilerin %4'ünün kesinlikle katılıyorum, %56'sının katılıyorum, %22'sinin kararsızım, %9'unun katılmıyorum, %9'unun kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.



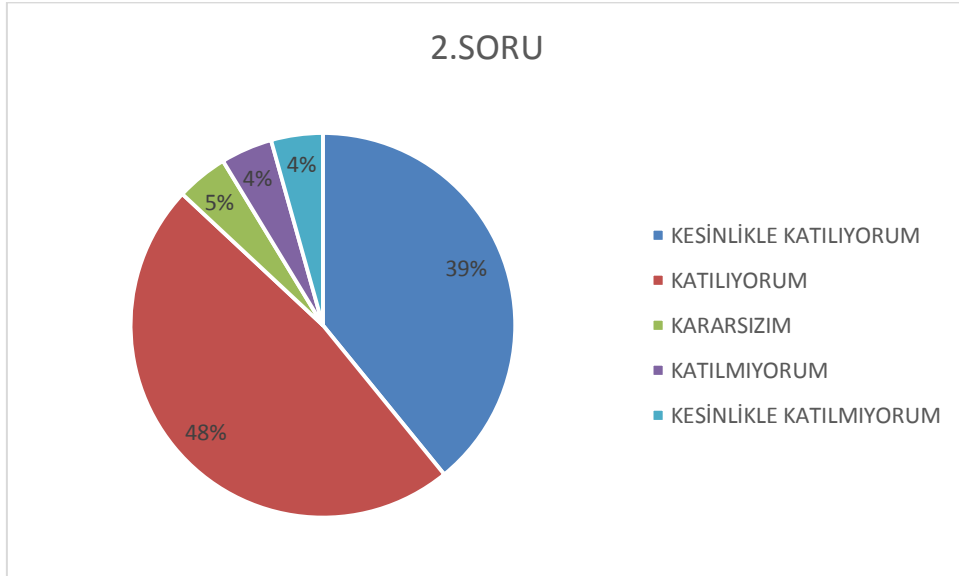
Şekil 5: Öğrencilerin son testteki 1. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 5'te, son testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa daha güvenli çalışma ortamları oluşacaktır” maddesine öğrencilerin %74'ünün kesinlikle katılıyorum, %22'sinin katılıyorum, %4'ünün kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir. Öğrencilerden kararsızım ve katılmıyorum cevabını veren bulunmamaktadır.



Şekil 6: Öğrencilerin ön testteki 2. soru için verdikleri cevapların dağılımları

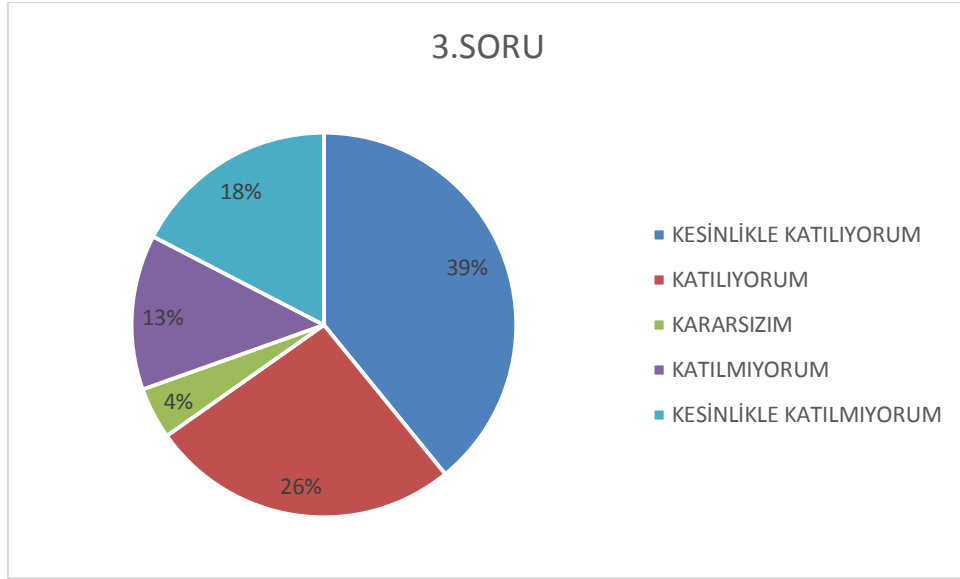
Şekil 6’da, ön testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa tehlikeli davranışlar azalacaktır” maddesine öğrencilerin %39’unun kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum, %17’sinin kararsızım, %9’unun katılmıyorum kalan %9’unun ise kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.



Şekil 7: Öğrencilerin son testteki 2. soru için verdikleri cevapların dağılımları

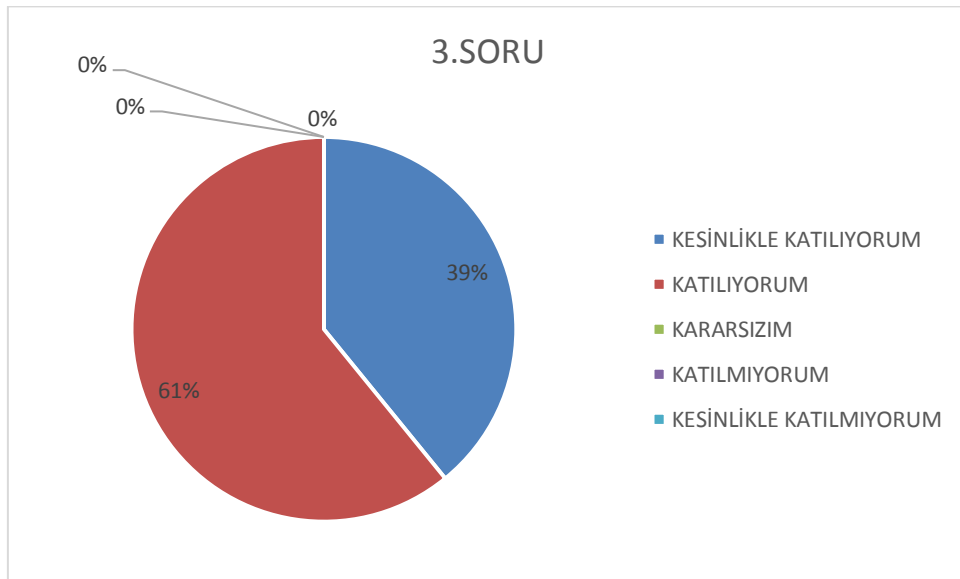
Şekil 7’de, son testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa tehlikeli davranışlar azalacaktır” maddesine öğrencilerin %39’unun kesinlikle katılıyorum, %48’inin katılıyorum, %5’inin kararsızım, %4’ünün katılmıyorum kalan %4’ünün ise kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



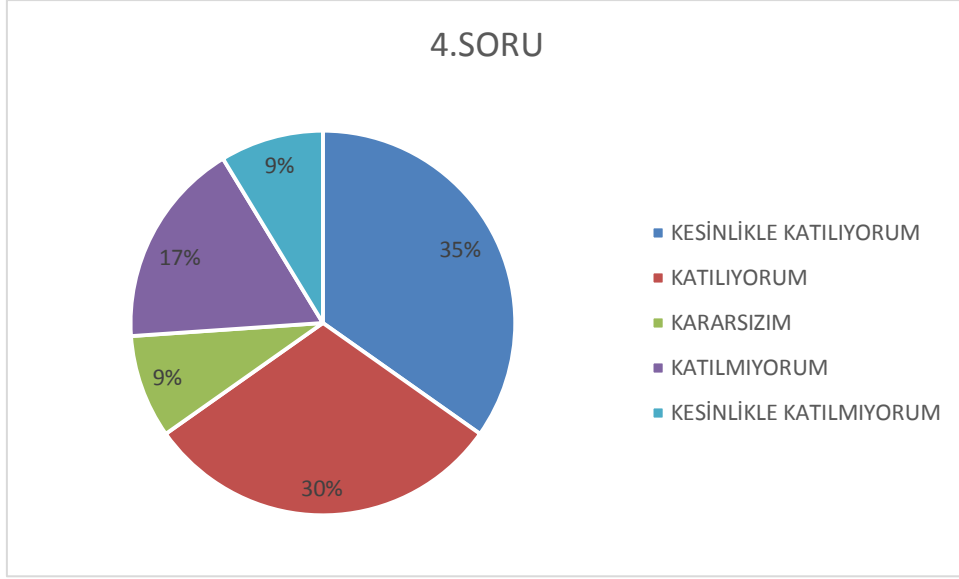
Şekil 8: Öğrencilerin ön testteki 3. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 8’de, ön testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa risk algısını arttıracaktır” maddesine öğrencilerin %39’unun kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum, %4’ünün kararsızım, %13’ünün katılmıyorum, %18’inin kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.



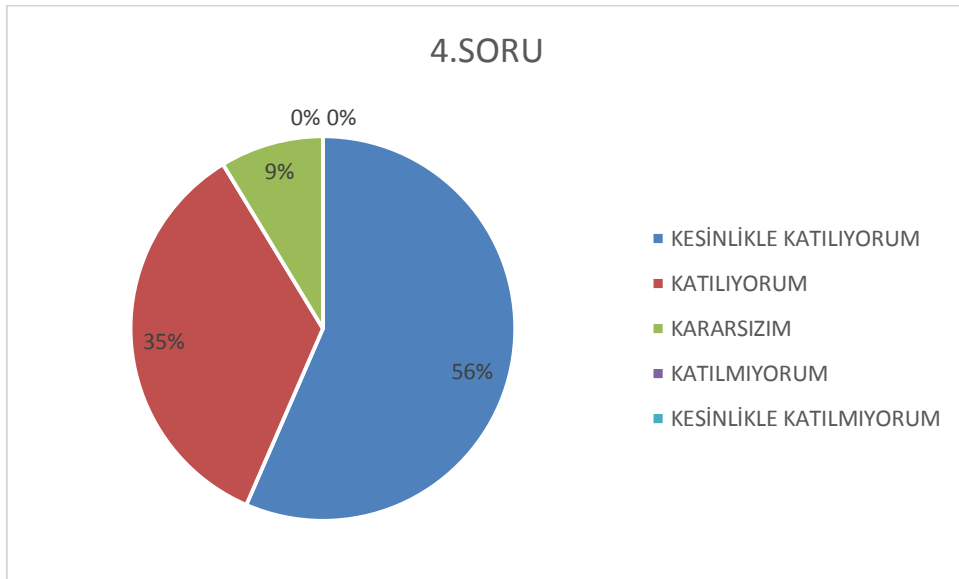
Şekil 9: Öğrencilerin son testteki 3. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 9’da, son testteki “Sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa risk algısını arttıracaktır” maddesine öğrencilerin %39’unun kesinlikle katılıyorum, %61’inin katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



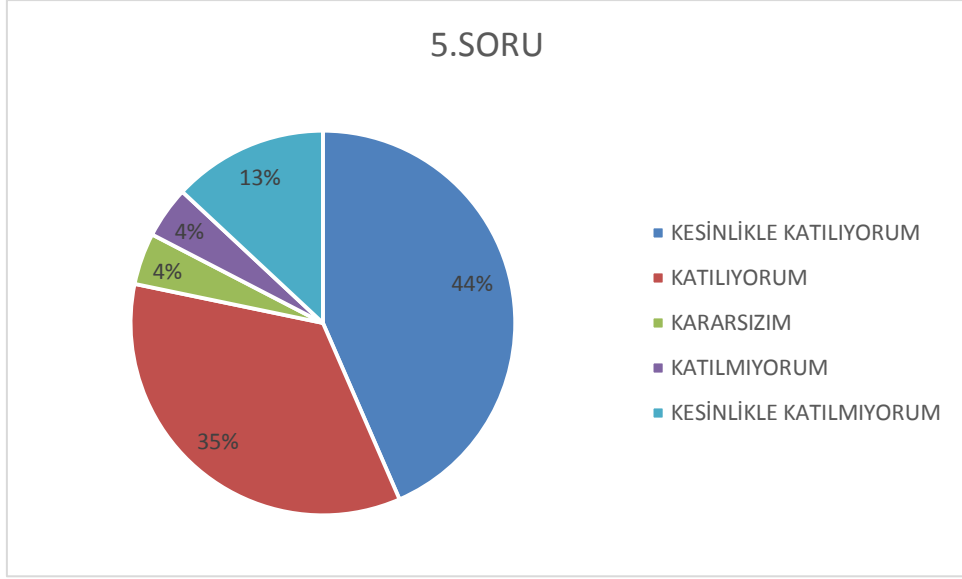
Şekil 10: Öğrencilerin ön testteki 4. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 10’da, ön testteki “Sanal gerçeklik uygulamalarını faydalı buluyorum” maddesine öğrencilerin %35’inin kesinlikle katılıyorum, %30’unun katılıyorum, %9’unun kararsızım, %17’sinin katılmıyorum, %9’unun kesinlikle katılmıyorum seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.



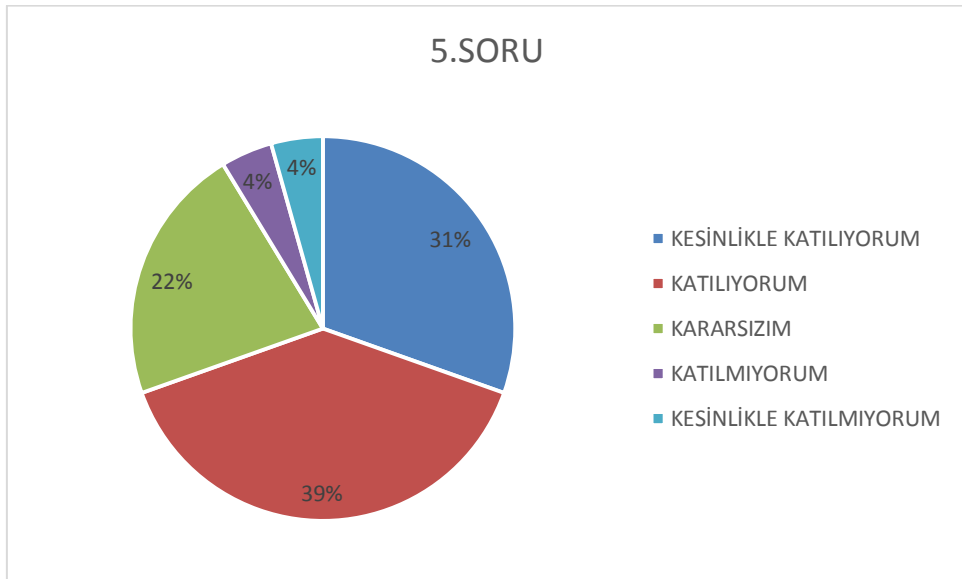
Şekil 11: Öğrencilerin son testteki 4. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 11’de, son testteki “Sanal gerçeklik uygulamalarını faydalı buluyorum” maddesine öğrencilerin %56’sının kesinlikle katılıyorum, %35’inin katılıyorum, %9’unun kararsızım cevabını verdiği, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



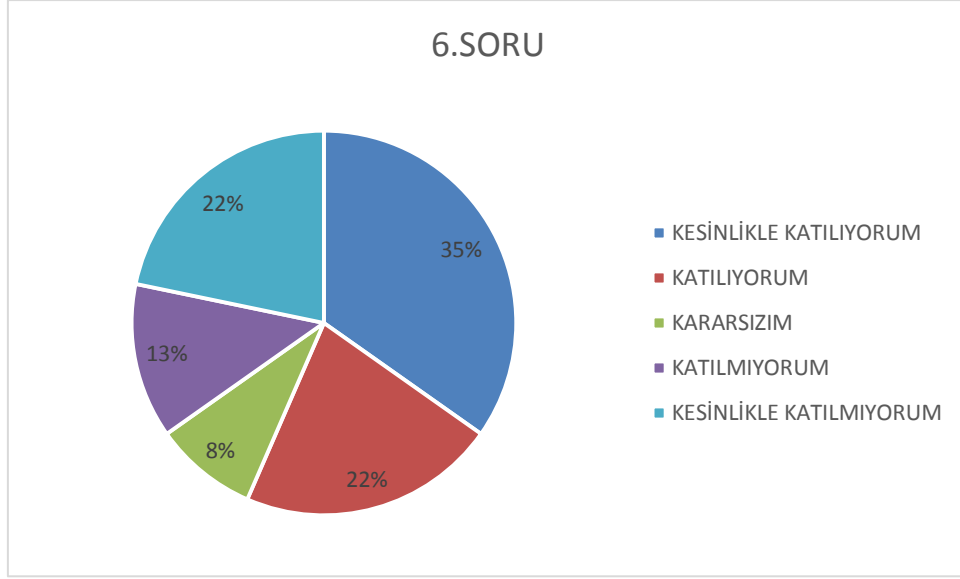
Şekil 12: Öğrencilerin ön testteki 5. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 12’de, ön testteki “Sanal gerçeklik uygulamalarını beğeniyorum” maddesine öğrencilerin %44’ünün kesinlikle katılıyorum, %35’inin katılıyorum, %4’ünün kararsızım, %4’ünün katılmıyorum, kalan %13’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



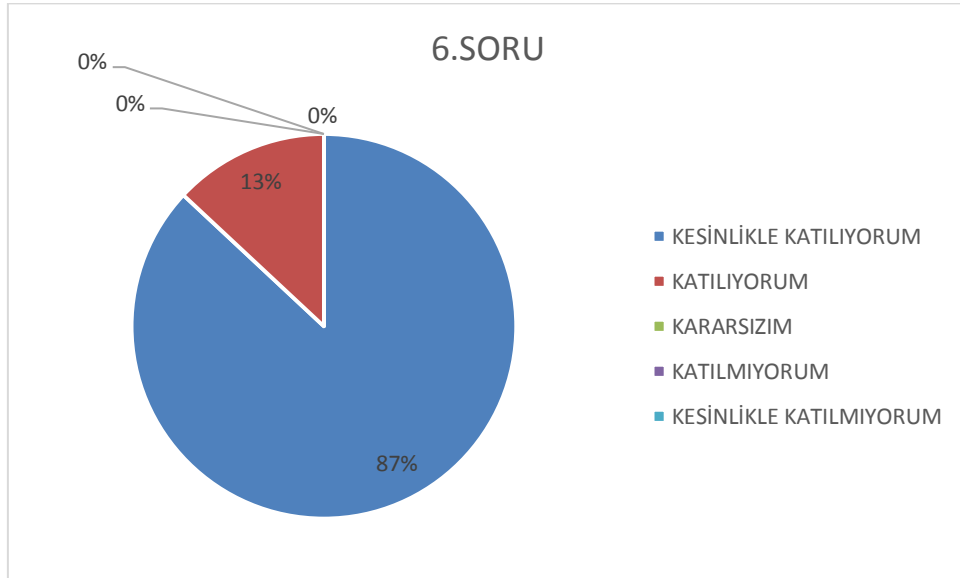
Şekil 13: Öğrencilerin son testteki 5. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 13’te, son testteki “Sanal gerçeklik uygulamalarını beğeniyorum” maddesine öğrencilerin %31’inin kesinlikle katılıyorum, %39’unun katılıyorum, %22’sinin kararsızım, %4’ünün katılmıyorum kalan %4’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



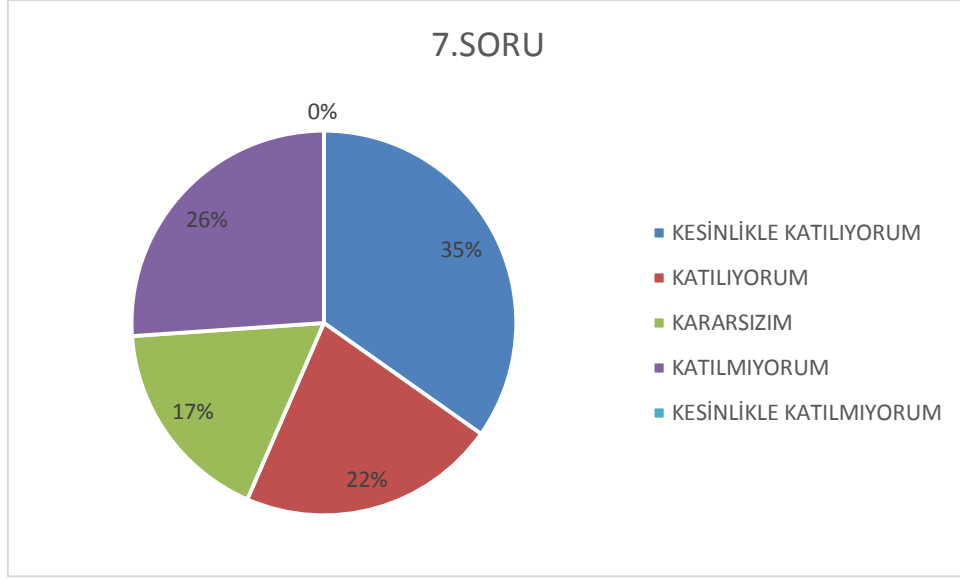
Şekil 14: Öğrencilerin ön testteki 6. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 14’de, ön testteki “Akademik eğitimde sanal gerçeklik uygulamaları kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %35’inin kesinlikle katılıyorum, %22’sinin katılıyorum, %8’inin kararsızım, %13’ünün katılmıyorum, %22’sinin ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



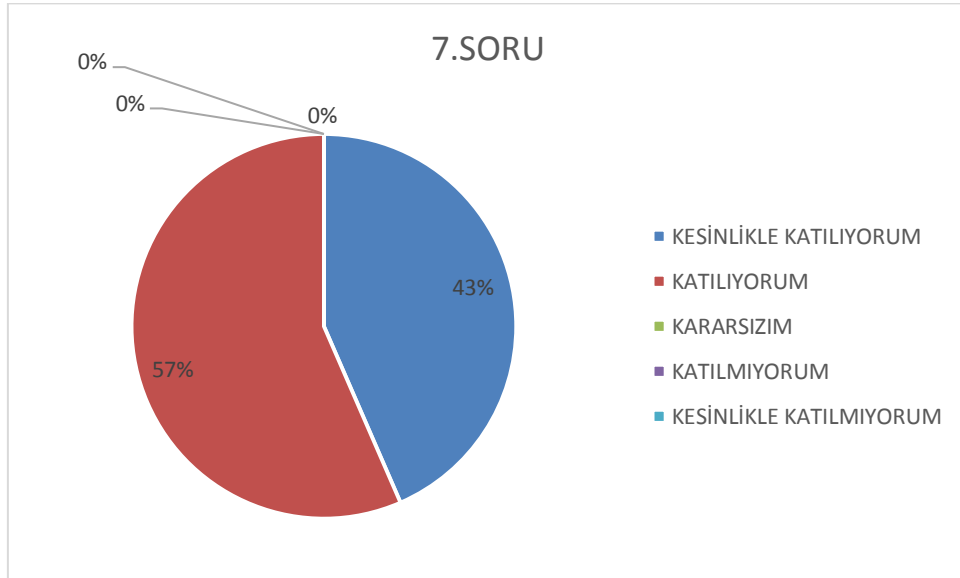
Şekil 15: Öğrencilerin son testteki 6. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 15’te, son testteki “Akademik eğitimde sanal gerçeklik uygulamaları kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %87’sinin kesinlikle katılıyorum, %13’ünün katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



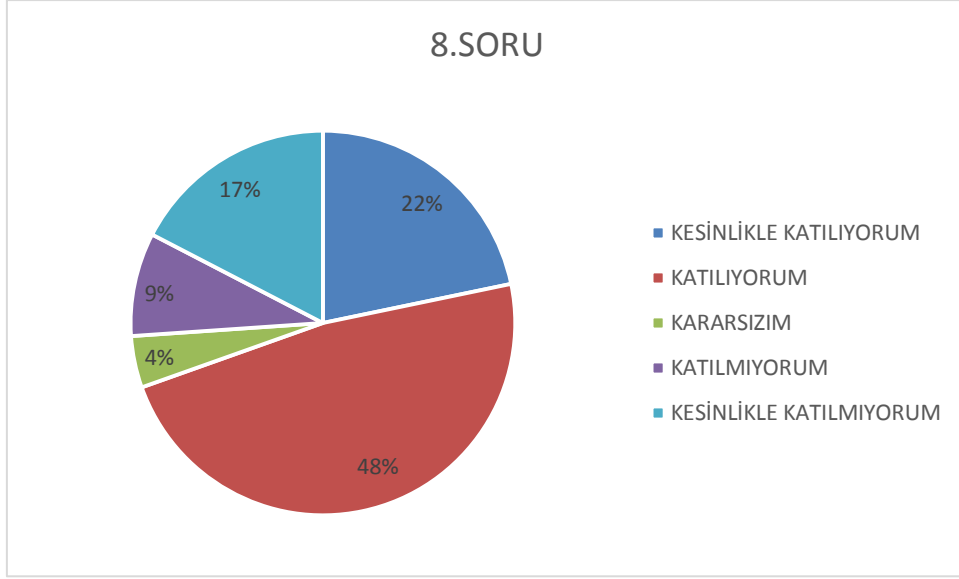
Şekil 16: Öğrencilerin ön testteki 7. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 16’da ön testteki “Tüm İSG eğitimlerinde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %35’inin kesinlikle katılıyorum, %22’sinin katılıyorum, %17’sinin kararsızım, %26’sının katılmıyorum cevabını verdiği ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren öğrenci bulunmadığı gösterilmektedir.



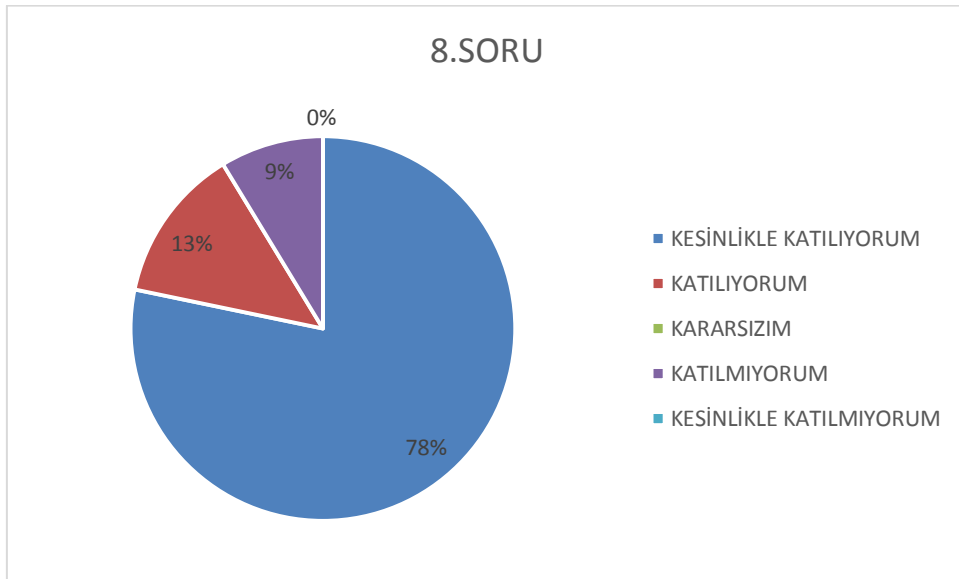
Şekil 17: Öğrencilerin son testteki 7. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 17’de, son testteki “Tüm İSG eğitimlerinde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %43’ünün kesinlikle katılıyorum, %57’sinin katılıyorum cevabını verdiği, Öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 18: Öğrencilerin ön testteki 8. soru için verdikleri cevapların dağılımları

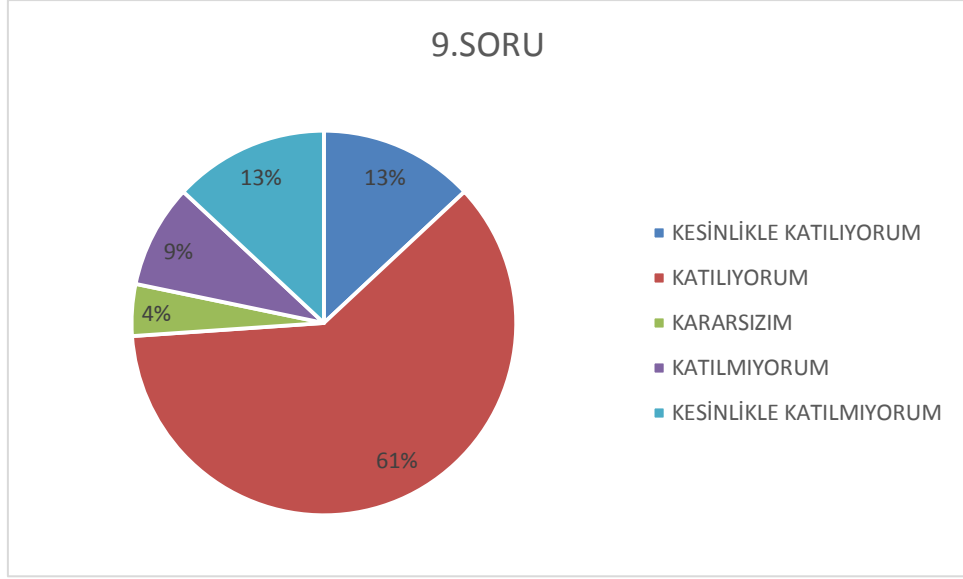
Şekil 18’de, ön testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları daha iyi bir eğitim almamı sağlar.” maddesine öğrencilerin %22’sinin kesinlikle katılıyorum, %48’inin katılıyorum, %4’ünün kararsızım, %9’unun katılmıyorum, %17’sinin ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



Şekil 19: Öğrencilerin son testteki 8. soru için verdikleri cevapların dağılımları

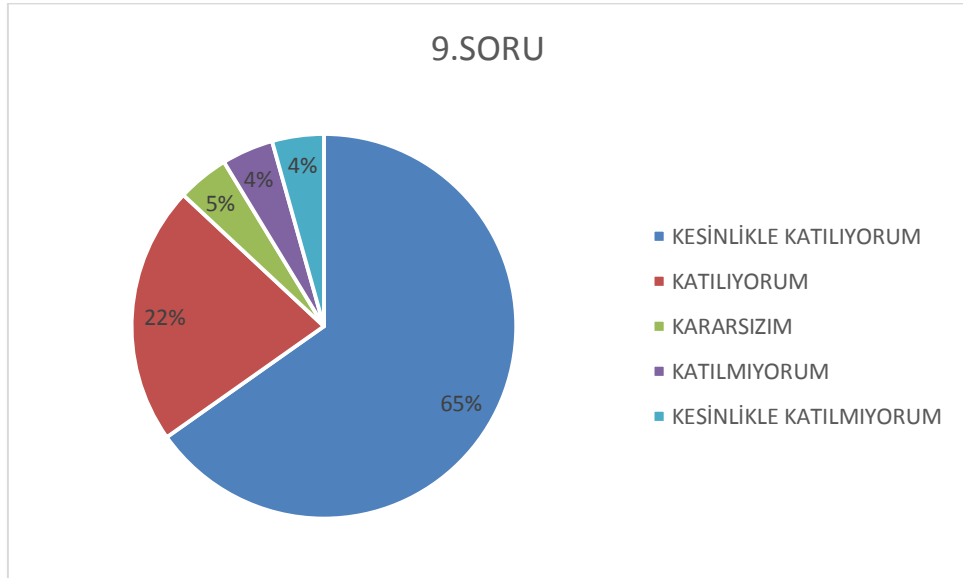
Şekil 20’de, son testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları daha iyi bir eğitim almamı sağlar.” maddesine öğrencilerin %78’inin kesinlikle katılıyorum, %13’ünün katılıyorum, %9’unun katılmıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



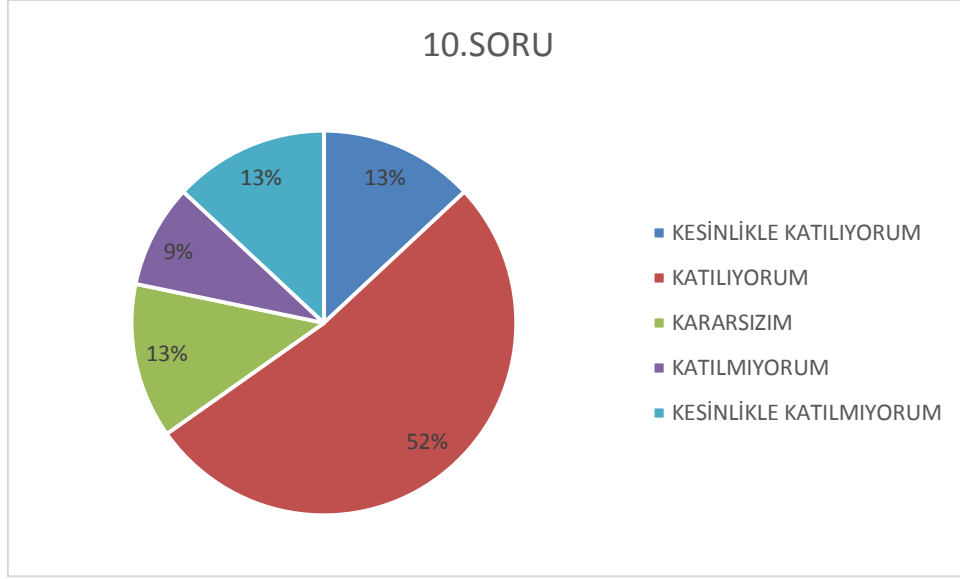
Şekil 20: Öğrencilerin ön testteki 9. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 20’de, ön testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerde uygulama eğitimi alma imkânı sağlar” maddesine öğrencilerin %13’ünün kesinlikle katılıyorum, %61’inin katılıyorum, %4’ünün kararsızım, %9’unun katılmıyorum ve %13’ünün kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



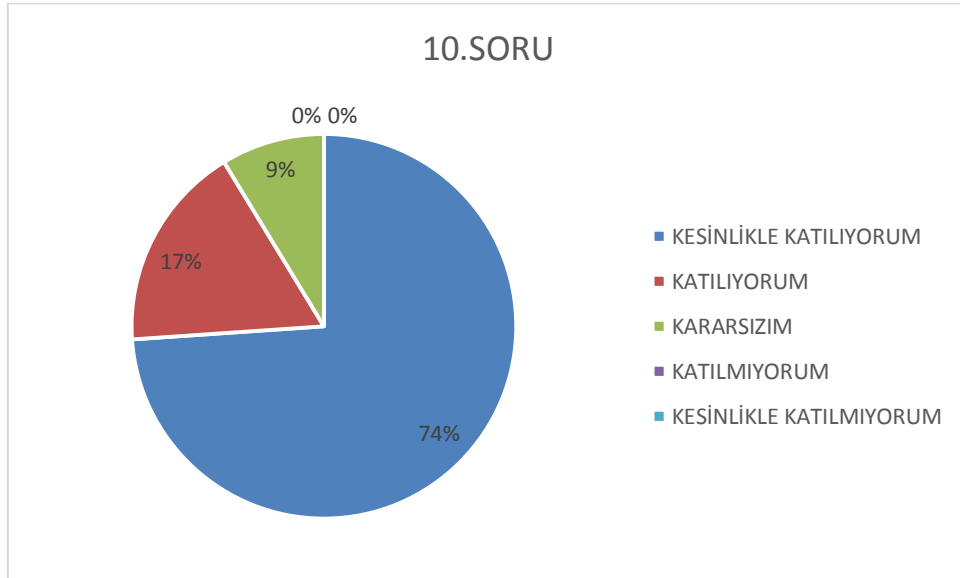
Şekil 21: Öğrencilerin son testteki 9. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 21’de, son testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerde uygulama eğitimi alma imkânı sağlar” maddesine öğrencilerin %65’inin kesinlikle katılıyorum, %22’sinin katılıyorum, %5’inin kararsızım, %4’ünün katılmıyorum kalan %4’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



Şekil 22: Öğrencilerin ön testteki 10. soru için verdikleri cevapların dağılımları

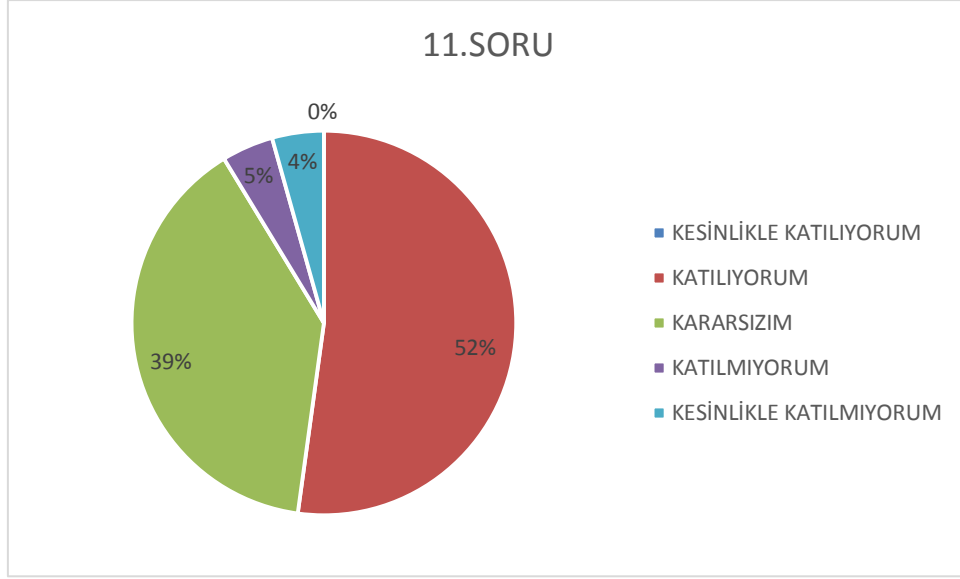
Şekil 22’de, ön testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları teorik eğitimlere göre tüm güvenlik kuralları ve prosedürleri dahi iyi anlamamı sağlar” maddesine öğrencilerin %13’ünün kesinlikle katılıyorum, %52’sinin katılıyorum, %13’ünün kararsızım, %9’unun katılmıyorum, %13’ünün kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



Şekil 23: Öğrencilerin son testteki 10. soru için verdikleri cevapların dağılımları

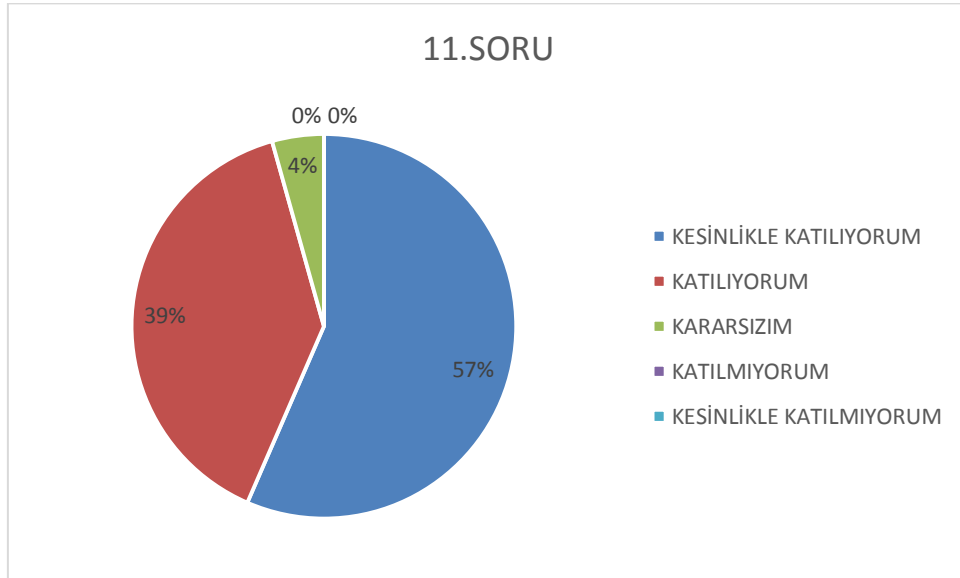
Şekil 23’te, son testteki “Sanal gerçeklik uygulamaları teorik eğitimlere göre tüm güvenlik kuralları ve prosedürleri dahi iyi anlamamı sağlar” maddesine öğrencilerin %74’ünün kesinlikle katılıyorum, %17’sinin katılıyorum, %9’unun kararsızım cevabını verdiği öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren ise bulunmadığı gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



Şekil 24: Öğrencilerin ön testteki 11. soru için verdikleri cevapların dağılımları

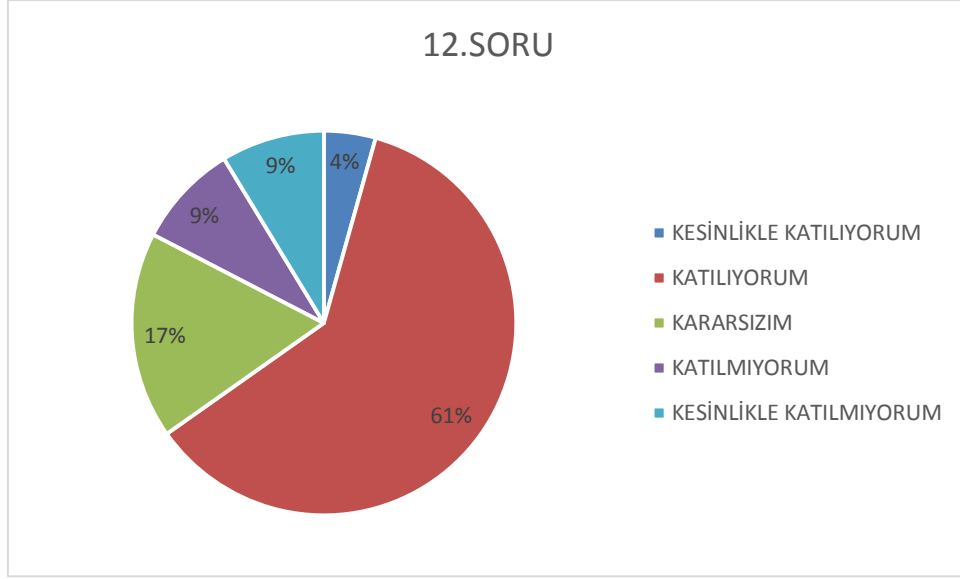
Şekil 24'te, ön testteki "Sanal gerçeklik uygulamasının faydalarını biliyorum" maddesine kesinlikle katılıyorum cevabını veren bulunmadığı, öğrencilerin %52'sinin katılıyorum, %39'unun kararsızım, %5'inin katılmıyorum, %4'ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



Şekil 25: Öğrencilerin son testteki 11. soru için verdikleri cevapların dağılımları

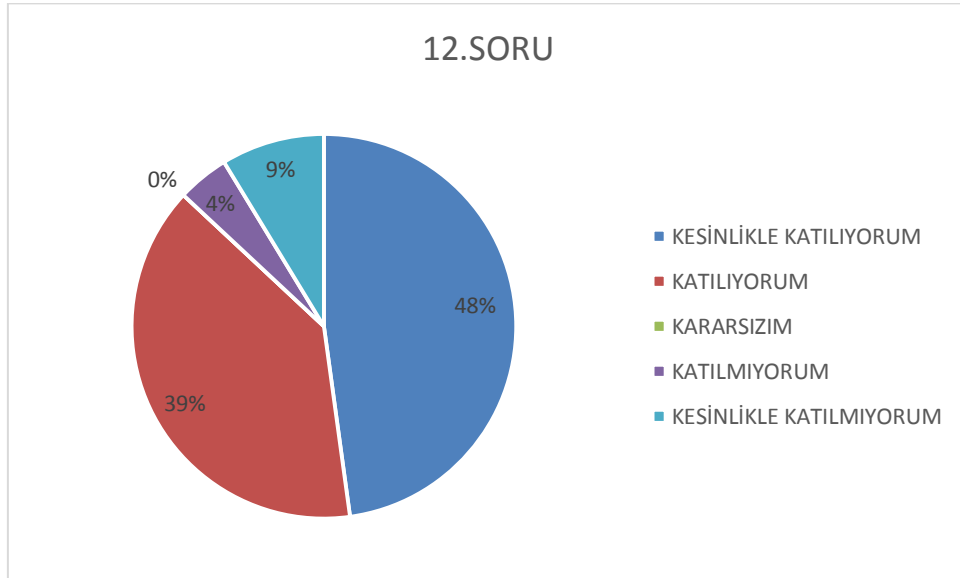
Şekil 25'te, son testteki "Sanal gerçeklik uygulamasının faydalarını biliyorum" maddesine öğrencilerden %57'sinin kesinlikle katılıyorum, %39'unun katılıyorum, %4'ünün kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



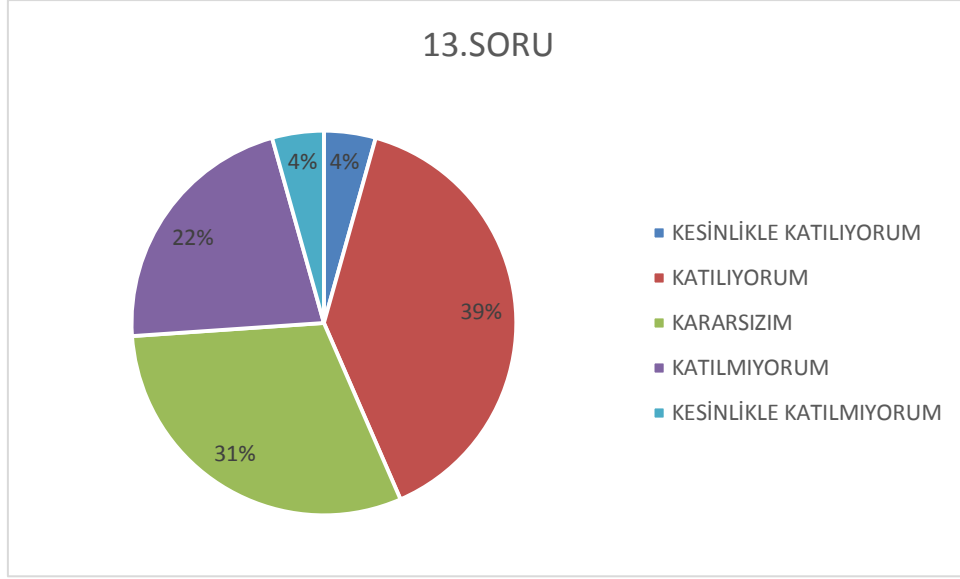
Şekil 26: Öğrencilerin ön testteki 12. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 26’da, ön testteki “Sanal Gerçeklik uygulaması boyunca herhangi bir rahatsızlık duyacağımı düşünmüyorum” maddesine öğrencilerin %4’ünün kesinlikle katılıyorum, %61’inin katılıyorum, %17’sinin kararsızım, %9’unun katılmıyorum, %9’unun kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



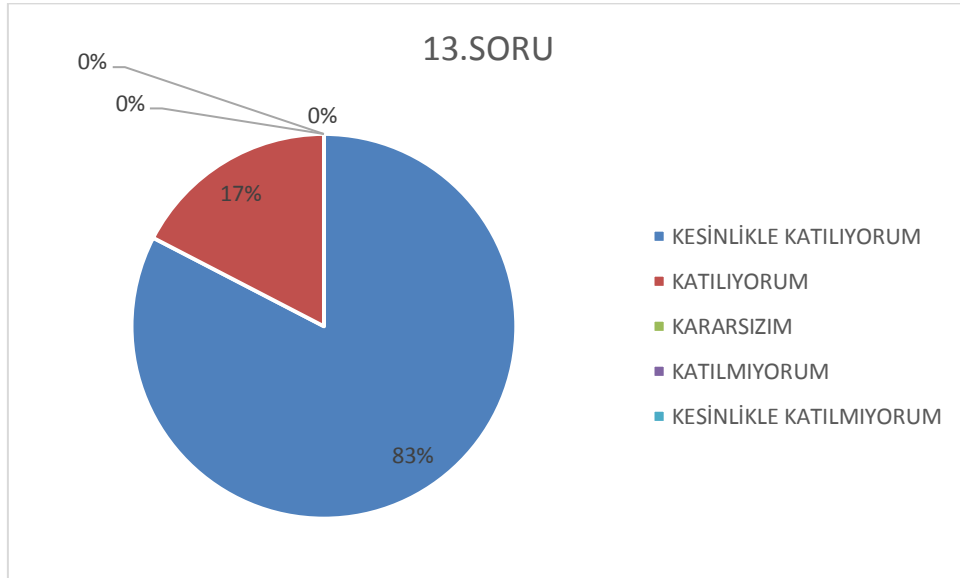
Şekil 27: Öğrencilerin son testteki 12. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 27’de, son testteki “Sanal Gerçeklik uygulaması boyunca mide bulantısı ya da baş dönmesi hissettim” maddesine öğrencilerden % 48’inin kesinlikle katılıyorum, %39’unun katılıyorum, %4’ünün katılmıyorum, %9’unun kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



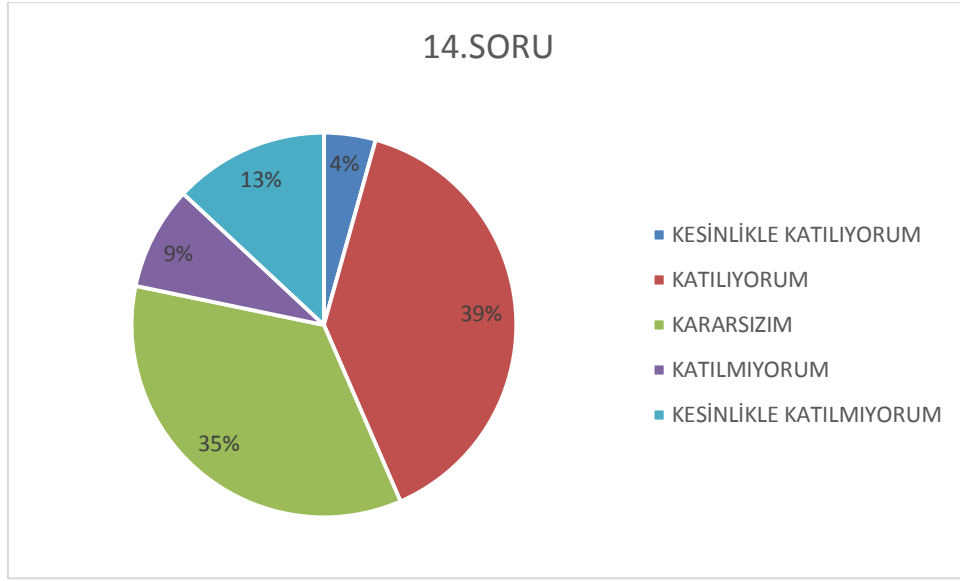
Şekil 28: Öğrencilerin ön testteki 13. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 28’de, ön testteki “Teorik eğitimlerde tehlikelerden doğacak sonuçları zihnimde canlandırmakta zorlanıyorum” maddesine öğrencilerin %4’ünün kesinlikle katılıyorum, %39’unun katılıyorum, %31’inin kararsızım, %22’sinin katılmıyorum, %4’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



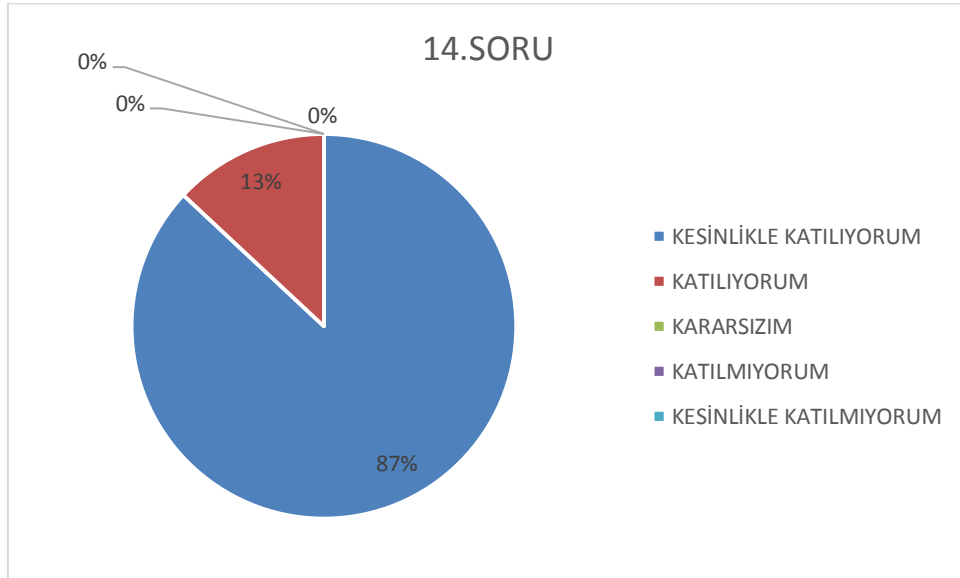
Şekil 29: Öğrencilerin son testteki 13. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 29’da, son testteki “Sanal gerçeklik eğitimi sonrasında tehlikelerden doğacak sonuçları zihnimde canlandırabiliyorum” maddesine öğrencilerden %83’ünün kesinlikle katılıyorum, %17’sinin katılıyorum cevabını verdiği, kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



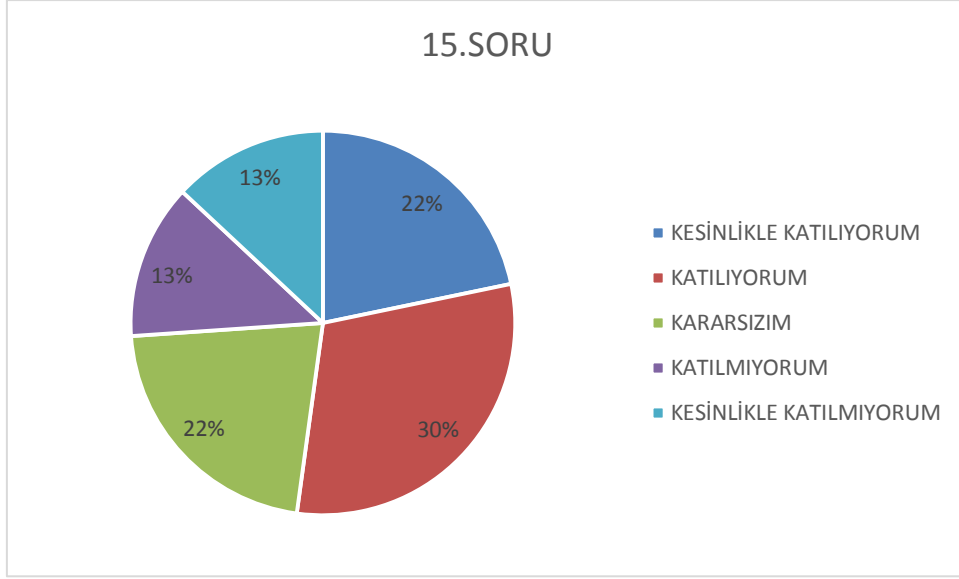
Şekil 30: Öğrencilerin ön testteki 14. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 30'da, ön testteki "Teorik eğitimler ilk gittiğim bir sektörde olası tehlike ve riskler için hazırlıklı olmamı sağlar." Maddesine öğrencilerin %4'ünün kesinlikle katılıyorum, %39'unun katılıyorum, %35'inin kararsızım, %9'unun katılmıyorum ve %13'ünün kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



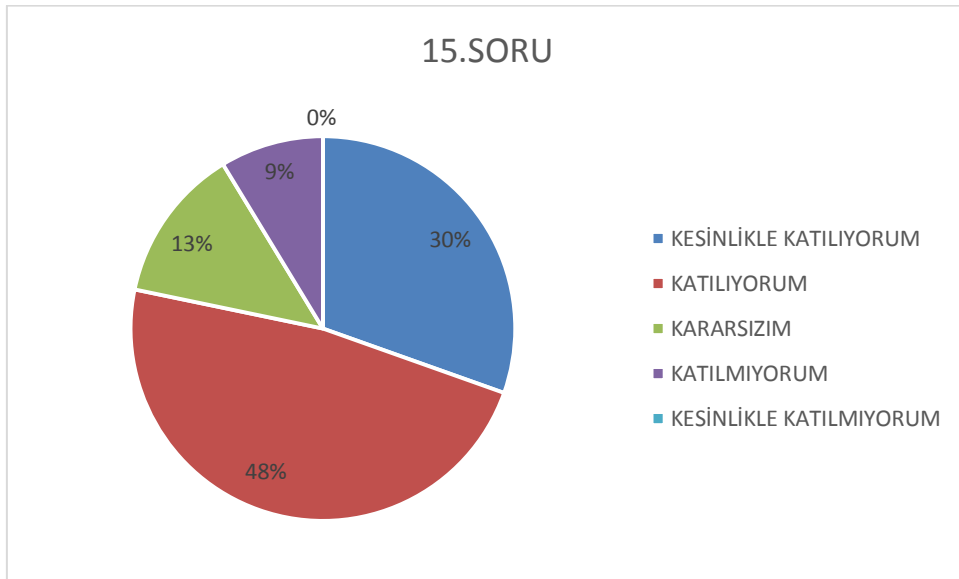
Şekil 31: Öğrencilerin son testteki 14. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 31'de, son testteki "Sanal gerçeklik uygulaması ilk gittiğim bir sektörde olası tehlike ve riskler için hazırlıklı olmamı sağlar" maddesine öğrencilerden %87'sinin kesinlikle katılıyorum, %13'ünün katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



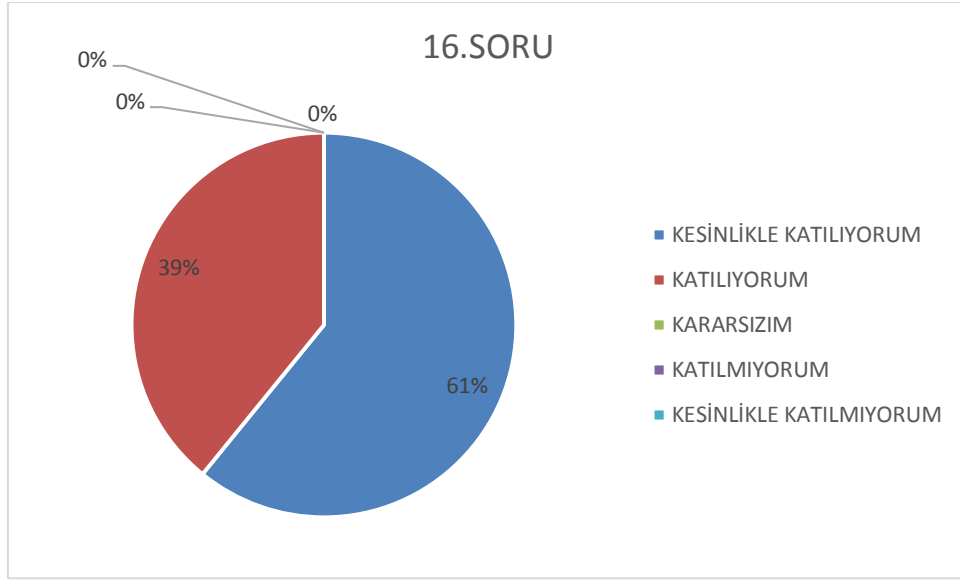
Şekil 32: Öğrencilerin ön testteki 15. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 32’de, ön testteki “Teorik eğitimlerin kalıcı olmadığını düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %22’sinin kesinlikle katılıyorum, %30’unun katılıyorum, %22’sinin kararsızım, %13’ünün katılmıyorum, %13’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



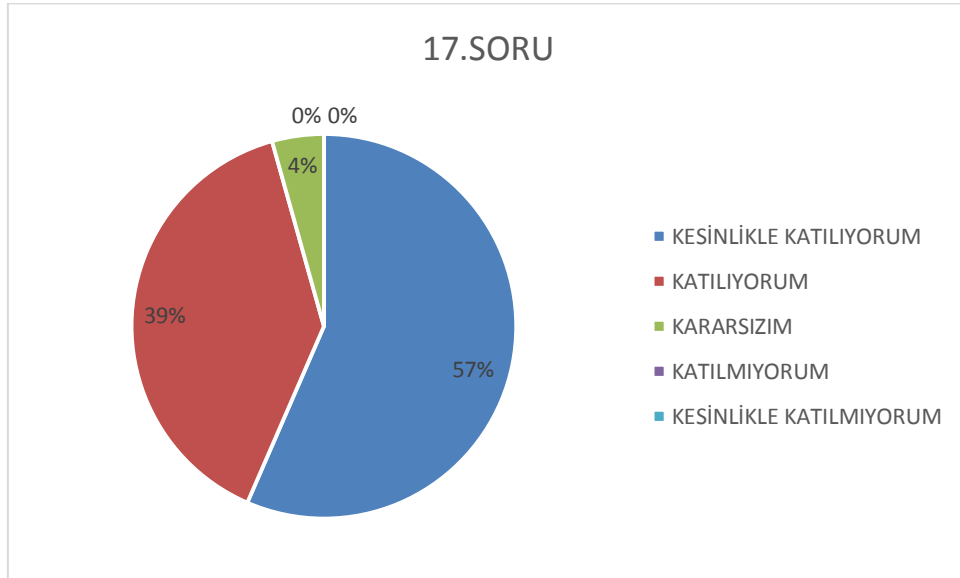
Şekil 33: Öğrencilerin son testteki 15. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 33’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılmasının kalıcı öğrenmeyi sağlayacağını düşünüyorum” maddesine öğrencilerden %30’unun kesinlikle katılıyorum, %48’inin katılıyorum, %13’ünün kararsızım, %9’unun katılmıyorum cevabını verdiği ve öğrencilerden kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 34: Öğrencilerin son testteki 16. soru için verdikleri cevapların dağılımları

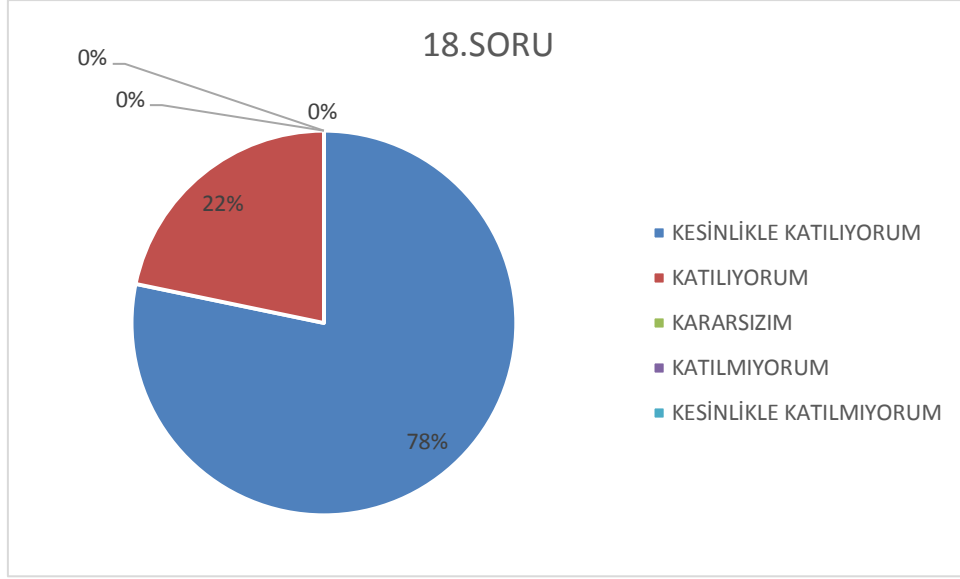
Şekil 34'te, son testteki "Sanal Gerçekliğin kullanıldığı dersler hem işitme hem de görme duyusuna hitap eder" maddesine öğrencilerden % 61'inin kesinlikle katılıyorum, %39'unun katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 35: Öğrencilerin son testteki 17. soru için verdikleri cevapların dağılımları

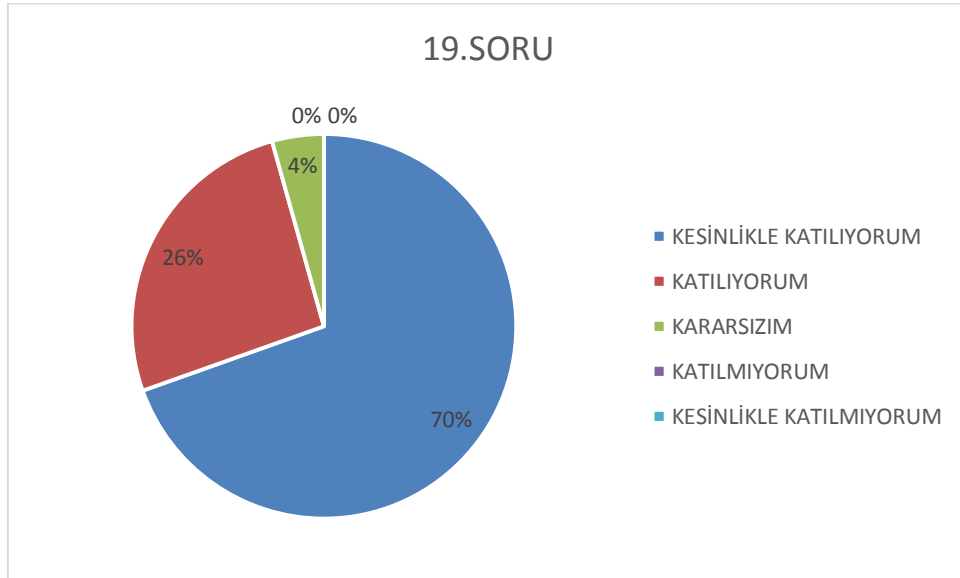
Şekil 35'te, son testteki "Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması anlamayı kolaylaştırır" maddesine öğrencilerden %57'sinin kesinlikle katılıyorum, %39'unun katılıyorum, %4'ünün kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



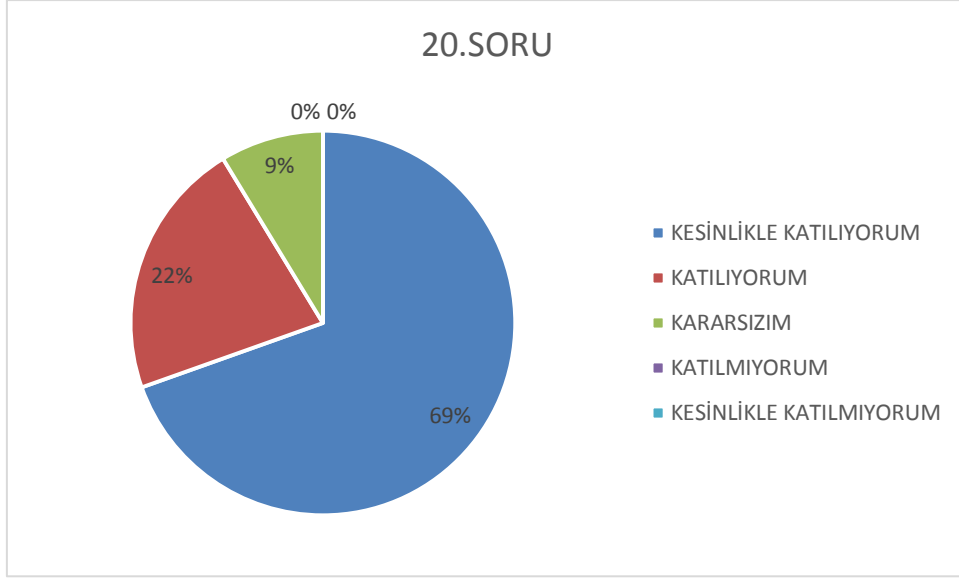
Şekil 36: Öğrencilerin son testteki 18. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 36’da, son testteki “Sanal gerçekliğin etkili kullanıldığı dersler daha eğlenceli hale gelir” maddesine öğrencilerden %78’inin kesinlikle katılıyorum %22’sinin katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



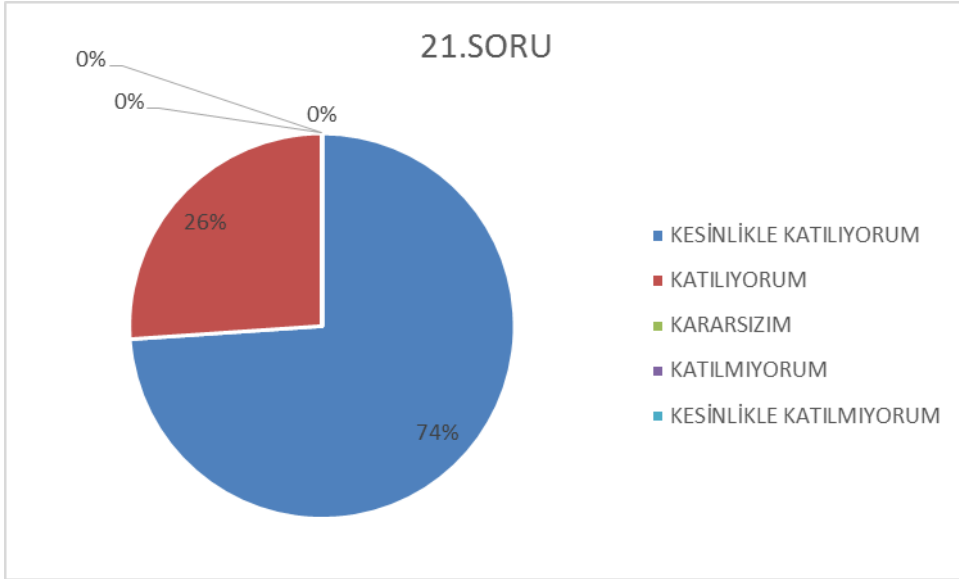
Şekil 37: Öğrencilerin son testteki 19. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 37’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derste kullanılması derse olan ilgiyi artırmada faydalıdır” maddesine öğrencilerden %70’inin kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum, %4’ünün kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 38: Öğrencilerin son testteki 20. soru için verdikleri cevapların dağılımları

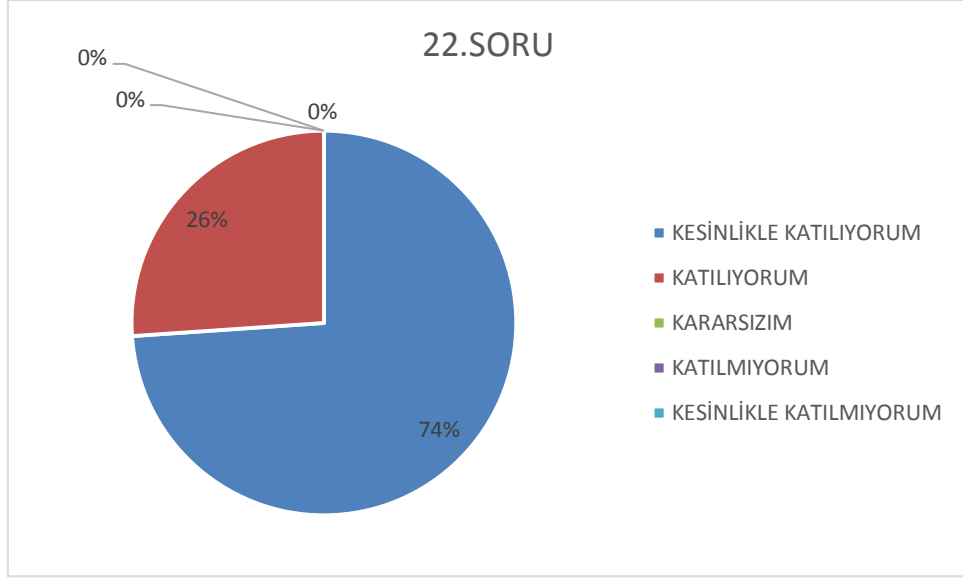
Şekil 38’de, son testteki “Sanal gerçekliğin etkili kullanıldığı derslerde öğrenci başarısı daha da yükselir” maddesine öğrencilerden %69’unun kesinlikle katılıyorum, %22’sinin katılıyorum, %9’unun kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 39: Öğrencilerin son testteki 21. soru için verdikleri cevapların dağılımları

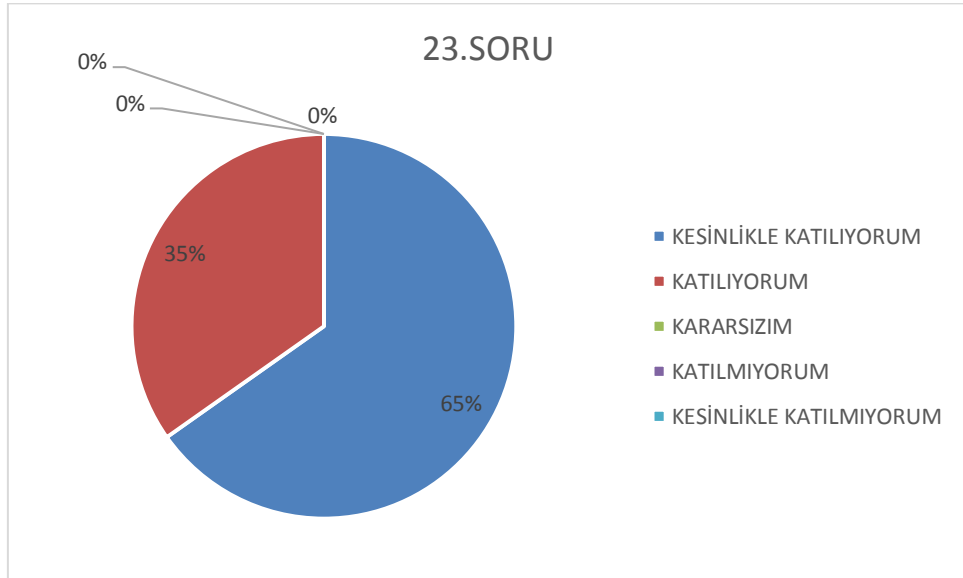
Şekil 39’da son testteki “Sanal gerçekliğin kullanıldığı dersler daha kolay öğrenilir” maddesine öğrencilerden %74’ünün kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ



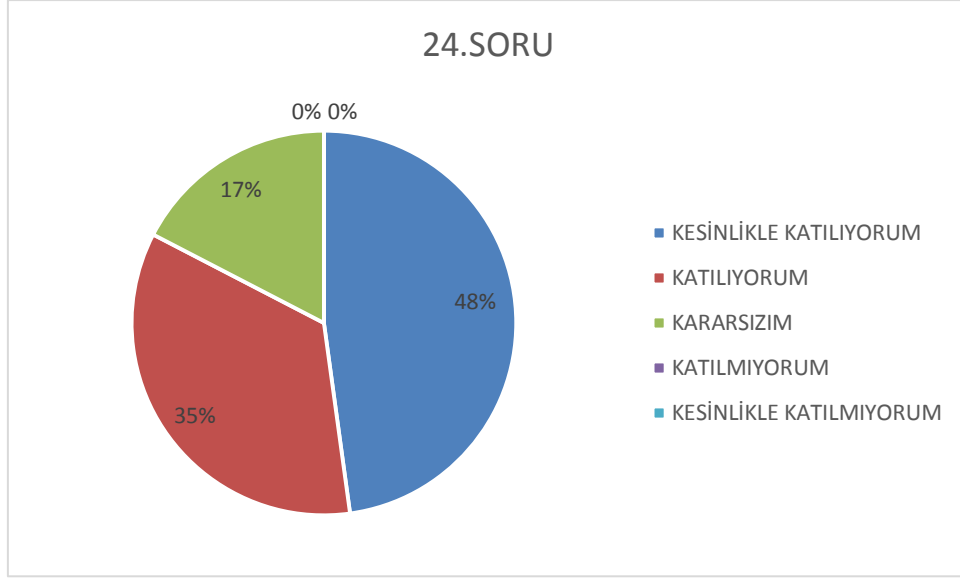
Şekil 40: Öğrencilerin son testteki 22. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 40’da son testteki “Derslerde sanal gerçeklik kullanılması motivasyonu artırır” maddesine öğrencilerden %74’ünün kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



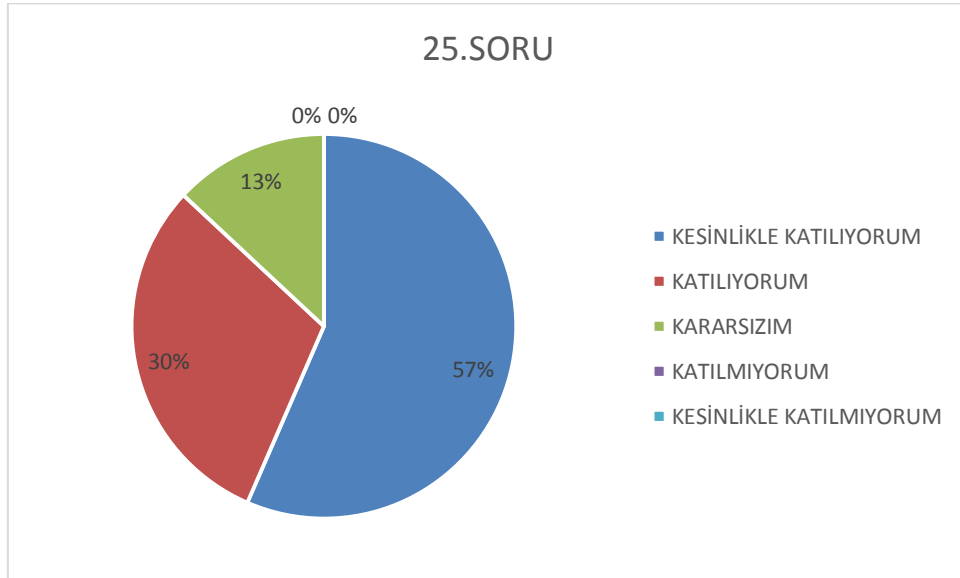
Şekil 41: Öğrencilerin son testteki 23. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 41’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde etkili kullanılması dersleri daha verimli hale getirir” maddesine öğrencilerden %65’inin kesinlikle katılıyorum, %35’inin katılıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



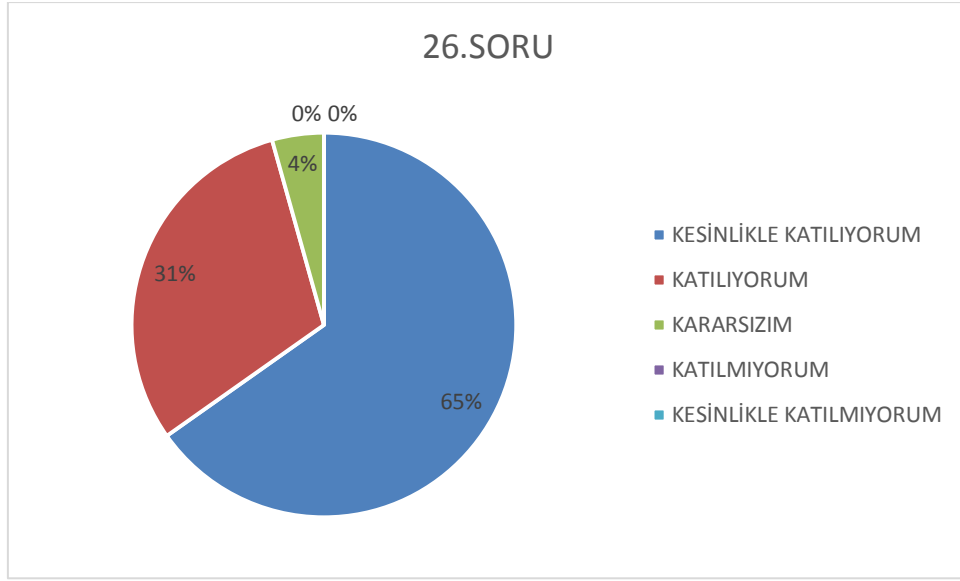
Şekil 42: Öğrencilerin son testteki 24. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 42’de, son testteki, “Sanal gerçekliğin derslerde etkili kullanılması zaman kazandırır” maddesine öğrencilerden %48’inin kesinlikle katılıyorum, %35’inin katılıyorum, %17’sinin kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



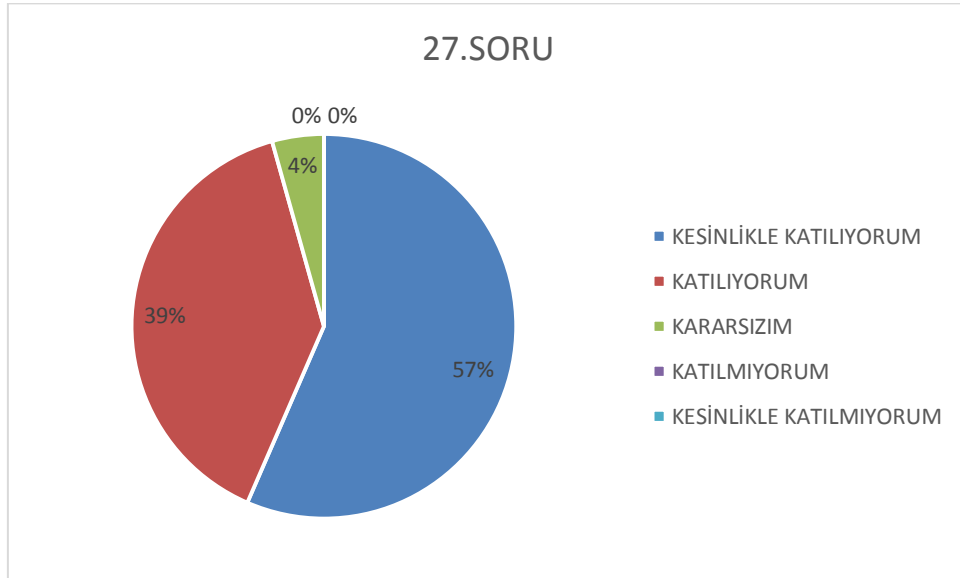
Şekil 43: Öğrencilerin son testteki 25. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 44’te, son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması konunun günlük hayatla ilişkilendirilmesine yardımcı olur” maddesine öğrencilerin %57’sinin kesinlikle katılıyorum, %30’unun katılıyorum, %13’ünün kararsızım cevabını verdiği, kararsızım, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



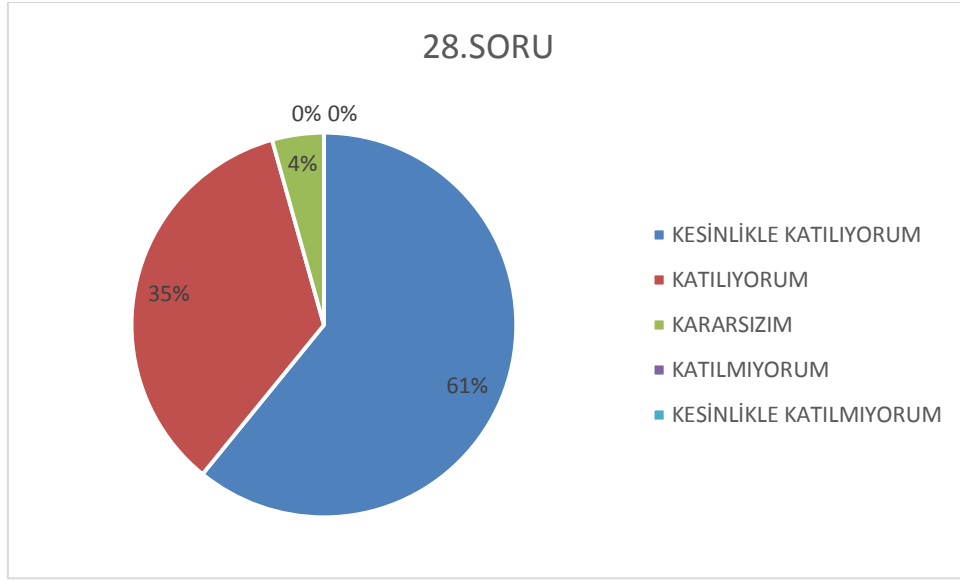
Şekil 44: Öğrencilerin son testteki 26. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 44'te, son testteki "Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması derslere araç-gereç bakımından zenginlik katar" maddesine öğrencilerden %65'inin kesinlikle katılıyorum, %31'inin katılıyorum, %4'ünün kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



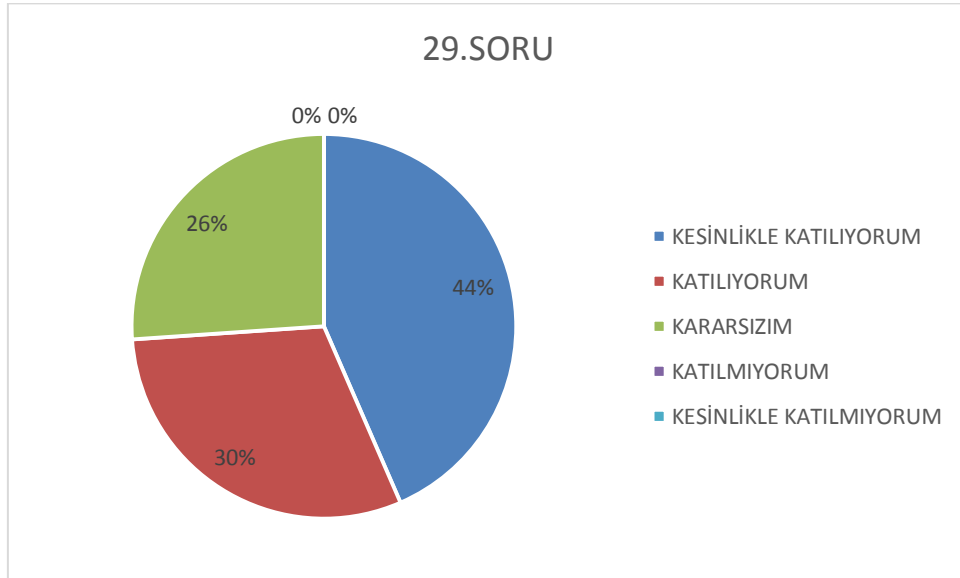
Şekil 45: Öğrencilerin son testteki 27. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 45'te, son testteki "Derslerde kavramları somutlaştırmak için sanal gerçeklikten faydalanılabilir" maddesine öğrencilerden % 57'sinin kesinlikle katılıyorum, %39'unun katılıyorum, %4'ünün kararsızım cevabını verdiği, öğrencilerden katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



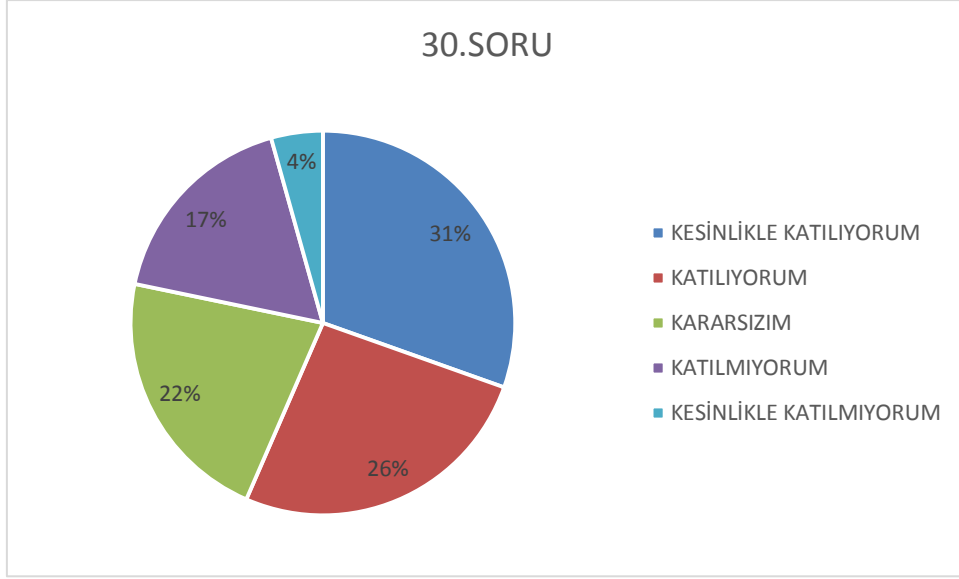
Şekil 46: Öğrencilerin son testteki 28. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 46’da, son testteki “Sanal gerçekliğin kullanıldığı derslerde öğretmen daha rahat konu tekrarı ve pratik yapar” maddesine öğrencilerden %61’inin kesinlikle katılıyorum, %35’inin katılıyorum, %4’ünün kararsızım cevabını verdiği, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



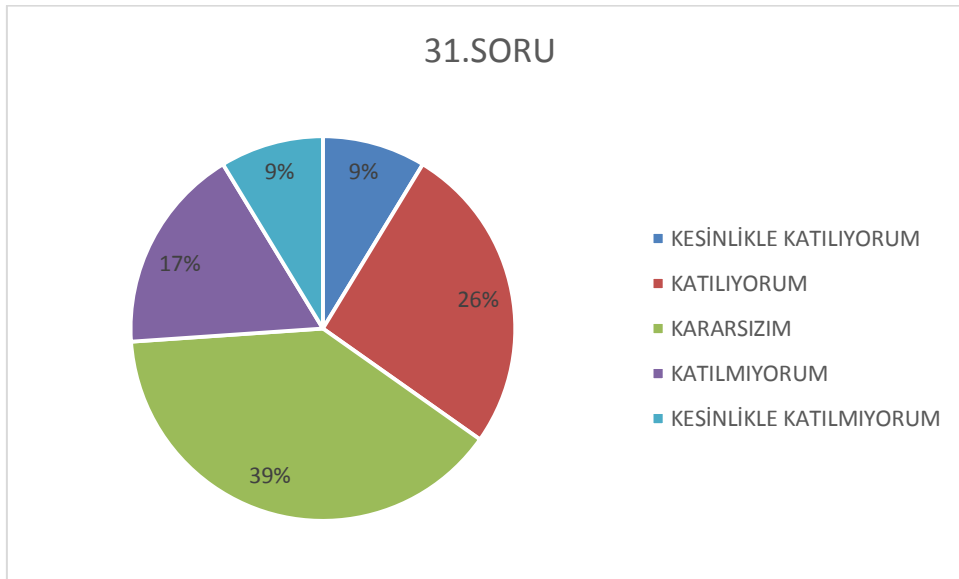
Şekil 47: Öğrencilerin son testteki 29. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 47’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrencilerin konuyu kendi hızlarına göre öğrenmelerini sağlar” maddesine öğrencilerden %44’ünün kesinlikle katılıyorum, %30’unun katılıyorum, %26’sının kararsızım cevabını verdiği, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren bulunmadığı gösterilmektedir.



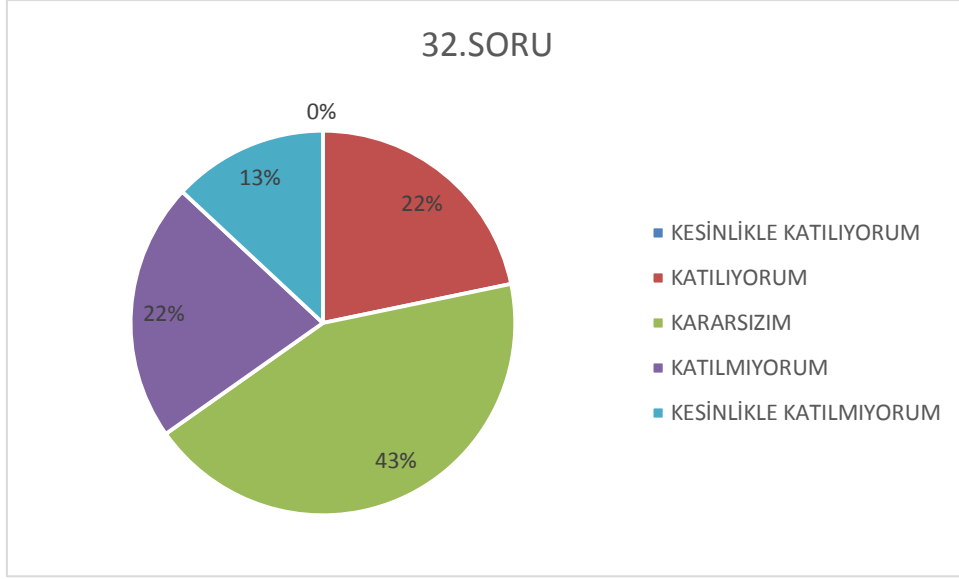
Şekil 48: Öğrencilerin son testteki 30. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 48’de, son testteki “Sanal gerçeklik her ders için uygun olmayabilir” maddesine öğrencilerden %31’inin kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum, %22’sinin kararsızım, %17’sinin katılmıyorum, %4’ünün ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



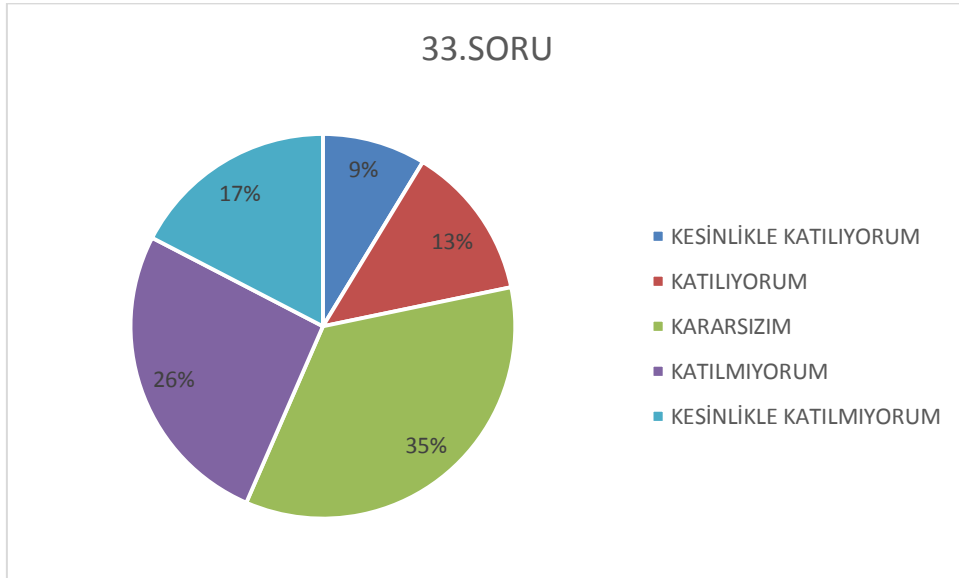
Şekil 49: Öğrencilerin son testteki 31. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 49’da, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması bazen dikkatin dağılmasına sebep olabilir” maddesine öğrencilerden %9’unun kesinlikle katılıyorum, %26’sının katılıyorum, %39’unun kararsızım, %17’sinin katılmıyorum, %9’unun ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



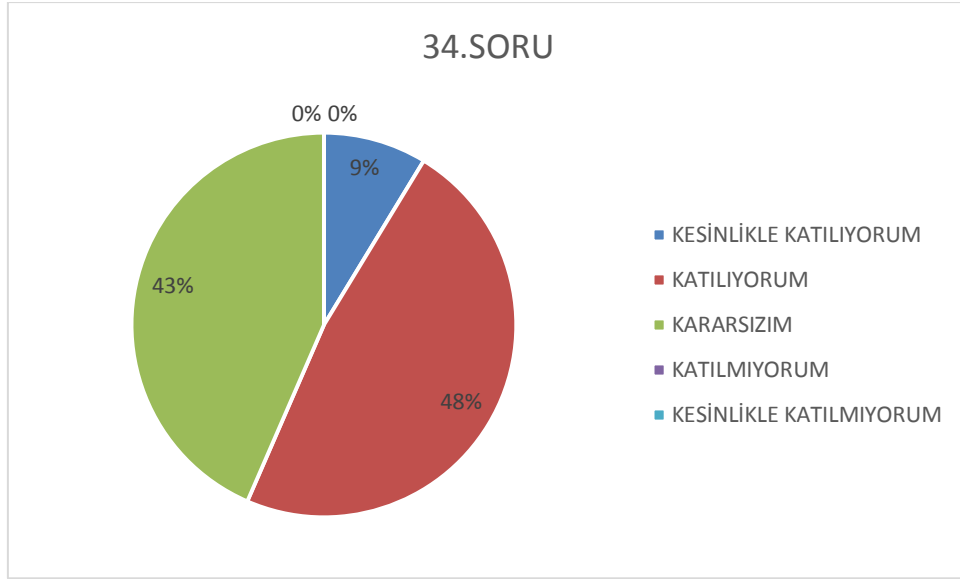
Şekil 50: Öğrencilerin son testteki 32. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 50’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması hazırcılığa ve kolaycılığa neden olabilir” maddesine öğrencilerden %22’sinin katılıyorum, %43’ünün kararsızım, %22’sinin katılmıyorum, %13’ünün kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği, öğrencilerden kesinlikle katılıyorum cevabını veren ise bulunmadığı gösterilmektedir.



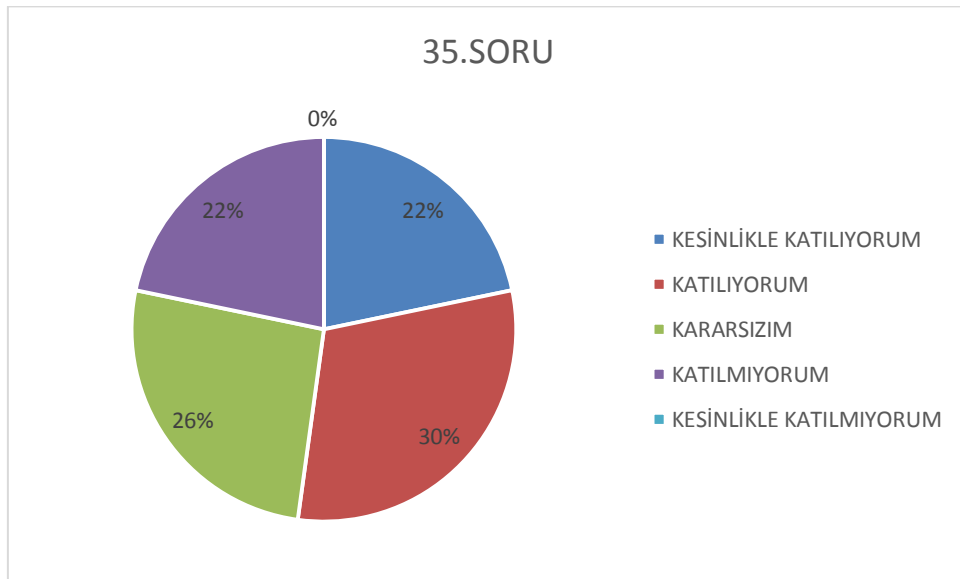
Şekil 51: Öğrencilerin son testteki 33. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 51’de, son testteki “Sanal gerçekliğin kullanıldığı derslerde eğiticinin (uzmanın) sınıf hâkimiyeti zorlaşır” maddesine öğrencilerden %9’unun kesinlikle katılıyorum, %13’ünün katılıyorum, %35’inin kararsızım, %26’sının katılmıyorum, %17’sinin kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



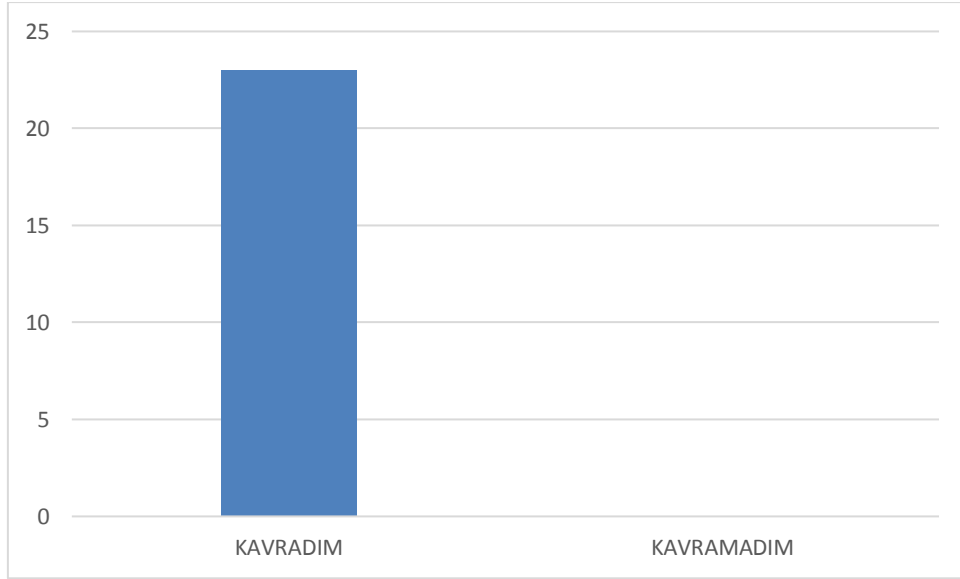
Şekil 52: Öğrencilerin son testteki 34. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 52’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrenci-öğretmen ya da uzman-çalışan iletişimini olumsuz etkiler” maddesine öğrencilerden %9’unun kesinlikle katılıyorum, %48’inin katılıyorum, %43’ünün kararsızım cevabını verdiği, katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren ise bulunmadığı gösterilmektedir.



Şekil 53: Öğrencilerin son testteki 35. soru için verdikleri cevapların dağılımları

Şekil 52’de, son testteki “Sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrencilerde eğlenceye yönelik beklentilere yol açabilir (oyun, video vb...)” maddesine öğrencilerden %22’sinin kesinlikle katılıyorum, %30’unun katılıyorum, % 26’sının kararsızım, % 22’sinin katılmıyorum, %22’sinin ise kesinlikle katılmıyorum cevabını verdiği gösterilmektedir.



Şekil 54: Uygulama sonrası “Sanal gerçeklik programının ne olduğunu kavradım” maddesine cevapların dağılımları

Şekil 54’te, uygulama sonrasında öğrencilerin tamamının sanal gerçeklik programının ne olduğunu kavradım seçeneğini işaretlediği gösterilmektedir.

5. TARTIŞMA

Grafik sonuçlarına bakıldığında “sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa daha güvenli çalışma ortamları oluşacaktır” maddesine ön testte öğrenciler %60 oranında katılım sağlamıştır. Son testte katılım oranı %96’ya yükselmiştir. Ön testteki %22 kararsızlık oranı mevcutken son testte kararsızlık söz konusu değildir. Ön testteki %18’lik katılmıyorum oranı %12’lik bir azalma göstermiştir. Bu durumda testler karşılaştırıldığında, uygulamalı eğitim sonrasında öğrenciler kendilerinde güvenlik algısının arttığını düşünmüşlerdir ve öğrenci fikirlerinde olumlu artış görülmüştür. Maddeye katılmayan öğrencilerde ise olumlu bir azalma görülmüştür. Sonuçlara göre öğrenciler kendilerinde davranış değişikliği fark etmişlerdir ve bu davranış değişikliğinin daha güvenli çalışma ortamları oluşturacağını düşünmektedirler.

Bir sonraki “sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa tehlikeli davranışlar azalacaktır” maddesine ön testte öğrenciler %65 oranında katılım sağlamıştır. Son testte ise bu oran %87 olmuştur. Ön testteki %17 oranındaki kararsızlık %5’e düşmüştür. Ön testteki bu maddeye katılmayan oranı ise %18’dir. Son testte ise katılmayanlar %10 oranında azalmıştır. Son duruma bakıldığında katılım oranının artmasının sebebi öğrencilerin uygulama eğitiminde düşme tehlikesini bizzat yaşadıkları için kendilerinde tehlikeli davranışları azalttığını düşünmeleri olabilir.

Ön testteki “sanal gerçeklik programları İSG eğitimlerinde kullanılırsa risk algısını arttıracaktır” maddesine ön testte öğrenciler %65 oranında katılım sağlamıştır. Katılmayanların oranı ise %31’dir. %4’lük bir kararsızlık söz konusudur. Son testte öğrencilerin tamamı uygulamalı eğitimin kendilerinde risk farkındalığını arttırdığını görmüştür. Sonuç olarak kararsız olan öğrencilerde de olumlu artışlar gözlemlenmiştir.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamalarını faydalı buluyorum” maddesine öğrenciler %65 oranında katılım göstermiştir. Katılmayanların oranı %26’dır. %9 oranında ise kararsız öğrenciler bulunmaktadır. Son testte katılmayan öğrenciler ise uygulama sonrası kendilerinde fayda gördüklerini ifade etmiştir. Ancak kararsız olan kişilerde kararsızlığını giderecek düşünceler oluşturulamamıştır.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamalarını beğeniyorum” maddesine öğrenciler % 44 oranında kesinlikle katılıyorum, %35 oranında katılıyorum, %4 oranında kararsızım, %4 oranında katılmıyorum, %13 oranında kesinlikle katılmıyorum cevabını vermiştir. Son testteki oranlar ise

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

uygulama sonrası %31 kesinlikle katılıyorum, %39 katılıyorum, %22 kararsızım, %4 katılmıyorum, %4 kesinlikle katılmıyorum şeklinde olmuştur. Sonuçlara bakıldığında, sanal gerçeklik uygulamasına ilk testte beğeniyorum yanıtını veren öğrenciler uygulama sonrası eğitimi beğenmeyerek katılım oranında %9'luk bir düşüşe sebep olmuştur. %4 oranındaki kararsız olan öğrencilerde daha çok kafa karışıklığı yaşanmıştır ve oranları son test ile %18'lik artış göstermiştir.

Ön testteki “akademik eğitimde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrenciler %57 oranında katılım sağlamıştır. Katılmayanların oranı ise %35'tir. Öğrencilerin %8'inde kararsızlık söz konusudur. Uygulama sonrası sanal gerçekliğin akademik eğitimlerde kullanılması fikrinde kararsız olan ve katılmayan %43 oranındaki öğrencilerin sanal gerçeklikten fayda sağlayarak gerek tehlikeyi yaşamak gerek yüksekte çalışmada kullanılması gereken ekipmanların gözlükte doğru seçilene kadar çalışılmaya başlanmaması gibi faktörler karşısında uygulama eğitimi ile fikirleri değişmiştir ve tamamı akademik eğitimlerde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Sonuç olarak öğrencilerin %100'ü akademik eğitimlerde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini düşünmektedir.

Ön testteki “tüm İSG eğitimlerinde sanal gerçeklik uygulamalarının kullanılması gerektiğini düşünüyorum” maddesine öğrencilerin %57'si katılmaktadır. Katılmayanların oranı %26'dır. Öğrencilerde %17 oranında bir kararsızlık mevcuttur. Son testteki verilere göre öğrencilerin %100 katılım sağlamıştır. Uygulamadan sonra sanal gerçekliğin tüm İSG eğitimlerinde kullanılması fikrine katılmayan ve kararsız kalan %43 oranındaki öğrenci oranı tamamen düşüş göstererek yerini katılıyorum ve kesinlikle katılıyorum seçeneğine bırakmıştır. Öğrencilerin tamamı akademik eğitimlerde olduğu gibi sektöre yönelik iş güvenliği eğitimlerinde de sanal gerçekliğin eğitimlerde kullanılması gerektiğini düşünmektedir.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamaları daha iyi bir eğitim almamı sağlar” maddesine öğrenciler %70 oranında katılım sağlamıştır. Bu katılım uygulama sonrası son testte %91'e yükselmiştir. Ön testte %26 oranında katılmayan öğrenci mevcuttur. Uygulama ile katılmayanların oranı %9'a düşmüştür. Ön testteki kararsız olan öğrencilerin oranı ise %4'dür. Son durumda öğrenciler her zaman aldıkları teorik eğitimlerle VR sonrası almış oldukları uygulama eğitimini karşılaştırabilme imkânı yakalamıştır. Bu karşılaştırmaya göre sanal gerçeklik uygulamalarının daha iyi bir eğitim modeli olmasına öğrenciler %91 oranında katılım sağlamıştır. Öğrencilerin kalan %9'u ise teorik eğitimlerin daha iyi olduğunu düşünmektedir.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamaları çok tehlikeli sınıfta yer alan işlerde uygulama eğitimi alma imkânı sağlar” maddesi için öğrencilerden %74 oranında katılım sağlanmıştır. Katılmayanların toplam oranı %22'dir. Kararsız öğrencilerin oranı %4'tür. Son testte oranlar %87 katılıyorum, %8 katılmıyorum, %5 kararsızım şeklinde değişmiştir. Buradan görülen, uygulama sonrasında çok tehlikeli olan çalışmalarda normal şartlarda yer alma imkânı olmayan öğrenciler aktif olarak rol alabildikleri için toplam katılmayanların oranı %14 oranında azalmıştır. Bununla birlikte kararsızlık oranı da artış göstermiştir.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamaları teorik eğitimlere göre tüm güvenlik kuralları ve prosedürleri dahi iyi anlamamı sağlar” maddesine öğrencilerin %65 oranında katılım sağlamıştır. Son testte bu oran %91'e ulaşmıştır. Ön testte katılmayan öğrencilerin oranı ise %22'dir. Uygulama sonrası son testte katılmayan öğrenci bulunmamaktadır. Ön testte öğrencilerde %13 oranında bir kararsızlık söz konusudur. Uygulama ile bu oran %9'a düşmüştür. Uygulama öncesinde katılmadığını belirten %22 olan öğrenci oranı gözlük kullanımı sonrasında teorik eğitimlere göre güvenlik prosedürlerini daha iyi anladığını ve sanal eğitimlerden fayda gördüğünü düşünmektedir (cümle düşük, oran mı azalmış). Öğrencilerin büyük bir çoğunluğu teorik eğitimlerin güvenlik kurallarını anlamaları için yetersiz olduğu kanısına varmıştır. Bu konuda yalnızca kafası karışık ve kararsız olan %9 oranında öğrenci bulunmaktadır.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulamasının faydalarını biliyorum” maddesine öğrencilerin %52 oranında katılıyorum, %39 oranında kararsızım, %5 oranında katılmıyorum, %4 oranında kesinlikle katılmıyorum cevabını vermiştir. Sanal gerçekliğin faydalarını bilmeme ve bunun avantaj mı yoksa dezavantaj mı olduğu konusunda karar verememe oranı öğrencilerin yarısını

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

oluşturmaktadır. Uygulamadan sonra son testte öğrencilerden %57 oranında kesinlikle katılıyorum, %39 oranında katılıyorum, %4 oranında kararsızım cevabını vermiştir. Bu durumda sanal gerçekliğin faydaları konusunda bir fikir sahibi olmayan öğrenciler uygulama sonrası sanal gerçeklikten tam fayda alarak maddeye katılım oranını %44 olarak artmıştır. Yalnızca bir fikir oluşturamayan %4'lük öğrenci oranı kalmıştır.

Ön testteki “sanal gerçeklik uygulaması boyunca herhangi bir rahatsızlık duyacağımı düşünmüyorum” maddesine öğrencilerden %4 kesinlikle katılıyorum, %61 katılıyorum, %17 kararsızım, %9 katılmıyorum, %9 kesinlikle katılmıyorum cevabı alınmıştır. Son testte ise oranlar %4 katılmıyorum, %9 kesinlikle katılmıyorum şeklinde değişmiştir. Uygulamayı deneyimledikten sonra öğrencilerin %13'ü mide bulantısı baş dönmesi gibi rahatsızlık hissetmiştir. Öğrencilerin büyük çoğunluğu ön testte belirttiği gibi herhangi bir rahatsızlık hissetmemiştir.

Ön testteki “teorik eğitimlerde tehlikelerden doğacak sonuçları zihnimde canlandırmakta zorlanıyorum” maddesine öğrencilerin %4 oranında kesinlikle katılıyorum, %39 oranında katılıyorum, %31 oranında kararsızım, %22 oranında katılmıyorum, %4 oranında kesinlikle katılmıyorum cevabını vermiştir. Bu durumda öğrencilerin yarısına yakın bir oranı teorik olarak aldığı eğitimlerde tehlikeleri zihninde canlandıramamaktadır. Bu konuda kararsız olan öğrenciler de çok fazladır. Teorik eğitimlerle tehlikeleri zihninde canlandırabildiğini düşünen öğrenciler tüm mevcudun 4'te 1'ini oluşturmaktadır. Bu oran bir hayli fazladır. Sanal gerçeklik eğitimi sonrasında ise son testteki “tehlikelerden doğacak sonuçları zihnimde canlandırabiliyorum” cevabını veren öğrencilerin oranı %100'e ulaşmıştır. Katılmıyorum ve kesinlikle katılmıyorum cevabını veren olmamıştır, bu konuda herhangi bir kafa karışıklığı yaşayan öğrenci de bulunmamaktadır. Bu durumda öğrenciler sanal gerçeklik uygulamasından tam verim almıştır.

Ön testteki “teorik eğitimler ilk gittiğim bir sektör de tehlike ve riskler için hazırlıklı olmamı sağlar.” maddesi için öğrenciler %43 oranında katılım göstermiştir. Uygulama sonrası son testte bu oran %100'e ulaşmıştır. Ön testteki %35 oranındaki kararsızlık ve %22 oranındaki katılmıyorum cevabını veren öğrenciler tamamen karar değiştirerek son testteki “sanal gerçeklik uygulamaları ilk gittiğim bir sektörde tehlike ve riskler için hazırlıklı olmamı sağlar.” maddesine katılım göstermiştir. Böylece teorik eğitimlerin öğrencileri veya çalışanları sektör tehlikelerine hazırladığına teste katılan öğrencilerin yarısı katılmaktadır. Bu öğrenciler yüksekteki tehlikeleri sanal gerçeklik uygulaması ile tamamen deneyimledikleri ve korkuyu, heyecanı bizzat yaşadıkları için sektöre kendilerini daha hazır hissettiklerini ve uygulamadan tam verim aldıklarını son teste katılım oranları ile göstermiştir.

Ön testteki “teorik eğitimlerin kalıcı olmadığını düşünüyorum” maddesine öğrencilerden %52 oranında katılım sağlanmıştır. Öğrencilerden katılmayanların oranı %26, kararsızlık oranı ise %22'dir. Son testte değişen “sanal gerçekliğin derslerde kullanılmasının kalıcı öğrenmeyi sağlayacağını düşünüyorum” maddesine öğrencilerden %78 katılıyorum, %9 katılmıyorum, %13 kararsızım cevabı alınmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında öğrencilerin %26'sı üzerinde bugüne kadar almış oldukları teorik eğitimler kalıcılık göstermiştir. Teste göre öğrencilerin yarısı ise teorik eğitim ile öğrendikleri bilgileri unuttuğunu düşünmektedir. Uygulama sonrası ön testte katılmıyorum cevabı veren öğrencilerin büyük bir çoğunluğunda karar değişikliği olmuştur. Bu durumda öğrenciler artık uygulamalı eğitimler sonrasında bilgilerin daha kalıcı olduğu fikrine varmıştır. Uygulamadan sonra da kararsız kalan öğrenciler kendini göstermektedir.

Ön testten bağımsız olan son testlere baktığımızda uygulama sonrası “sanal gerçekliğin kullanıldığı dersler hem işitme hem de görme duyusuna hitap eder” maddesine uygulama eğitiminde öğrenciler görerek duyarak ve hissederek çalışma gerçekleştirme imkânı bulabildiği için öğrencilerin tamamı katılım sağlamıştır. Kararsız olan ve katılmayan öğrenci bulunmamaktadır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması anlamayı kolaylaştırır” maddesine uygulama sonrası öğrenciler %96 oranında katılım sağlamıştır. Uygulamaya katılıp kararsız kalanların oranı %4'tür. Bu sonuçlar gösteriyor ki uygulamadan sonra öğrencilerin yarısından fazlası (%57) kesinlikle katılıyorum cevabını vererek yüksekte çalışmayı tam olarak anlamış, yarısına yakını (%39) katılıyorum cevabını vererek çalışmadan verim almıştır.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

Son testteki “sanal gerçekliğin etkili kullanıldığı dersler daha eğlenceli hale gelir” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %100 oranında katılım sağlamıştır. Orandan anlaşıldığı üzere öğrenciler sanal gerçeklik ile gerçekleştirilen uygulamalı eğitimi teorik eğitime göre daha eğlenceli olarak gerçekleştirmiştir. Eğlenerek öğrenmek öğrenciler için önemli bir faktörü oluşturmaktadır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derste kullanılması derse olan ilgiyi artırmada faydalıdır” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %96 oranında katılım sağlamıştır. Uygulamalı eğitim öğrencilerin neredeyse tamamında ilgi uyandırmıştır fakat %4'lük bir kısmında fikir oluşmasına yardımcı olamamıştır ve öğrenciler kararsızım cevabını vermiştir.

Son testteki “sanal gerçekliğin etkili kullanıldığı derslerde öğrenci başarısı daha da yükselir” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %91 oranında katılım sağlamıştır. Öğrenciler teorik eğitimlere kıyasla ilk defa aldıkları bu sanal dersin kendilerine daha fazla başarı kattığını düşünmektedir. Fakat kişilerin(öğrencilerin) %9'u kararsız kalmıştır.

Son testteki “sanal gerçekliğin kullanıldığı dersler daha kolay öğrenilir” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %100 katılım sağlamıştır. Sanal gerçeklik ile öğrencilerin tamamı yüksekte çalışma gerçekleştirip tehlikelerini, risklerini görerek, yapmaları gereken davranışları deneyimleyerek ve sesli komutlarla çalışma gerçekleştirerek teorik eğitimlere kıyasla daha kolay öğrenim sağladıklarını düşünmektedir.

Son testteki “derslerde sanal gerçeklik kullanılması motivasyonu artırır” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %100 katılım sağlamıştır. Sanal gerçeklik uygulaması ile eğitim eğlenceli hale gelmiştir ve tüm öğrencilerde motivasyon oluşturmuştur.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde etkili kullanılması dersleri daha verimli hale getirir” maddesine uygulamadan sonra öğrencilerden %65 kesinlikle katılıyorum, %35 katılıyorum cevabı alınmıştır. Dersten verim alamayan veya bu konuda kararsız bulunan öğrenci bulunmamaktadır. Öğrencilerin yarısından fazlası dersten %100 oranında verim almıştır.

Son testteki, “sanal gerçekliğin derslerde etkili kullanılması zaman kazandırır” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler %83 oranında katılım sağlamıştır. Öğrencilerin %17'si eğitim zaman kazandırır mı yoksa zaman kaybı olur mu konusunda kararsızlık yaşamıştır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması konunun günlük hayatla ilişkilendirilmesine yardımcı olur” maddesine uygulamadan sonra öğrencilerden %87'si katılım sağlanmıştır. Öğrencilerin kalan %13'ü ise eğitimi günlük hayatla bağdaştırma konusunda kararsız kalmıştır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması derslere araç-gereç bakımından zenginlik katar” maddesine uygulamadan sonra, derslerde tahta ve projeksiyon haricinde kullanılan sanal gerçeklik gözlüğü öğrencilerin %96'sında derslerin araç gereç bakımından daha zengin geçtiğini düşüncesine yol açmıştır. Geri kalan öğrenciler bu konuda kararsızdır.

Son testteki “derslerde kavramları somutlaştırmak için sanal gerçeklikten faydalanılabilir” maddesine uygulama ile öğrenciler yüksekte çalışma kavramını somutlaştırma imkânı yakalamıştır. Kullanacakları kişisel koruyucu donanımlarını bizzat kendileri seçerek ve direğe tırmanma deneyimini yaşayarak yaralanmadan düşme tehlikesi yaşamışlardır. Bunlar göz önüne alındığında öğrencilerin %96'sı gözlüğün uygulamalı dersleri somutlaştırmak için kullanılabileceğini düşünmektedir. Kalan öğrencilerin bu konuda herhangi bir fikri yoktur.

Son testteki “sanal gerçekliğin kullanıldığı derslerde öğretmen daha rahat konu tekrarı ve pratik yapar” maddesine uygulamadan sonra öğrencilerin %96'sı sanal gerçekliğin öğrenim açısından yalnızca kendilerinde değil bilgilerin doğru bir şekilde öğrencilere aktarılması açısından öğretmenlere de faydalı olacağını düşünmektedir. Öğrencilerin %4'ü ise bu durumun öğretmenler için faydalı mı yoksa bunun aksi yönde mi olacağı konusunda tam fikre varamadığından kararsızım cevabını vermiştir.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrencilerin konuyu kendi hızlarına göre öğrenmelerini sağlar” maddesine uygulamadan sonra öğrenciler eğitimi kendileri tarafından

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

yönlendirme imkânı yaşamıştır bu sebepten de çalışmayı kendi hızlarına göre gerçekleştirdikleri için kendi hızlarına göre öğrenim gerçekleştirmiştir ve bu maddeye %74 oranında katılıyorum cevabını vermiştir. Öğrencilerin %26'sı bu konuda kararsızdır.

Son testteki “sanal gerçeklik her ders için uygun olmayabilir” maddesine uygulamadan sonra öğrencilerin yarısından fazlası (%57) sanal gerçeklik uygulamasının her derse yönelik uygun bir uygulama olmadığını düşünmektedir. Öğrencilerin yalnızca % 21'i sanal gerçeklik teknolojisinin her türlü derse uygun bir uygulama olacağını düşünmektedir. Öğrencilerin %22'si kararsızdır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması bazen dikkatin dağılmasına sebep olabilir” maddesi için öğrencilerin %35'inde dikkat dağınıklığı yaşanırken yalnızca %26'sında dikkat dağınıklığına sebep olmamıştır. Öğrencilerin %39'u kararsızım cevabı ile dikkatlerinin dağılıp dağılmadığını dahi algılayamamıştır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması hazırcılığa ve kolaycılığa neden olabilir” maddesine uygulama sonrası öğrencilerden %22'si katılıyorum, %43'ü kararsızım, %35'i katılmıyorum cevabını vermiştir. Katılıyorum cevabını veren öğrencilerin oranı azımsanamayacak kadar fazladır. İlk uygulama sonrası bile öğrencilerin hazırcılığa alışmaya açık olduğu görülmektedir.

Son testteki “sanal gerçekliğin kullanıldığı derslerde eğiticinin (uzmanın) sınıf hâkimiyeti zorlaşır” maddesine uygulamadan sonra öğrencilerden %22 oranında katılıyorum cevabı alınmıştır. Öğretmen aynı anda gözlük kullanan ve gözlük kullanmak için sırasını bekleyen yani o sırada boş olan öğrenciler üzerinde hâkimiyetini sağlamak zorunda kalacaktır. Bu da öğretmenlerin zorlanmasına sebep olabilir. Öğrencilerden %43 oranında da katılmıyorum cevabı alınmıştır. Sonuçlara bakıldığında sınıf hâkimiyetinin zorlaşacağını düşünmeyenlerin sayısı düşünenlerden daha fazladır. Kararsız olanların oranı ise %35'tir.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrenci-öğretmen ya da uzman-çalışan iletişimini olumsuz etkiler” maddesine uygulama sonrası öğrencilerden %57 oranında katılıyorum cevabı alınmıştır. Katılmayan öğrenci bulunmamakla birlikte %43 oranında kararsızlık vardır. Öğrencilerin diğer cevaplarına bakıldığında çoğu seçenekte sanal gerçeklikten verim aldıkları belirtilmiştir buna rağmen bu maddede olumsuzluk ağırlıktadır. Teknolojinin eğitimlerde insan ilişkilerini olumsuz etkileyebileceğini düşünen öğrenci sayısı çok fazladır.

Son testteki “sanal gerçekliğin derslerde kullanılması öğrencilerde eğlenceye yönelik beklentilere yol açabilir (oyun, video vb...)” maddesine uygulama sonrasında öğrencilerin %30'unda eğlence beklentisi oluşmuştur. Öğrencilerin %26'sı da bu konuda kararsızdır. Öğrencilerin %44'ünde neredeyse yarısına yakın bir kısmında uygulama herhangi bir beklentiye yol açmamıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, sanal gerçeklik uygulamalarının iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerindeki etkisini, bir üniversitenin iş sağlığı ve güvenliği bölümü 3. Sınıf öğrencileri üzerinde test etmiştir. Sanal gerçeklik programlarıyla iş sağlığı ve güvenliği alanında yapılabilecek çalışmalar, iş güvenliği eğitimlerinde uygulamalı eğitim bakımından eksikliğin giderilmesinde büyük ölçüde katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma mevcut imkânlar sebebiyle telefona uyumlu VR gözlüğü ile sınırlı kalmıştır. Maddi ve teknik imkânlar doğrultusunda, farklı sanal gerçeklik uygulamalarının iş güvenliği eğitimlerinde kullanılmasının çok faydalı olacağı görülmektedir.

Her kişi kendi algılarına göre farklı öğrenme yetisine sahiptir. Buna göre somut öğrenme becerisine sahip kişiler hissederek ve izleyerek, soyut öğrenme becerisine sahip kişiler düşünce yoluyla, aktif öğrenme becerisine sahip kişiler o işi yaparak öğrenmektedirler. Bu doğrultuda eğitimlerde kişilerin cihazla etkileşimleri sırasında duyma, görme ve düşünme yetisinin yanında temas olarak hissiyat sağladıkları ve anlık kendi davranışlarına göre geri dönüşüm alabildikleri sanal gerçeklik cihazlarının iş güvenliği öğrencilerinde ve çalışma hayatındaki işçilerin İSG eğitimlerinde kullanılması sağlanmalıdır.

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

Sanal gerçeklik sistemleri günümüz eğitim sistemlerine alternatif değil destekleyici olarak düşünülmelidir. Bu sistemler için yazılım oluşturma maliyeti gözlükten daha maliyetlidir. Gözlükle beraber destekleyici birçok komut verici ekipman da düşünüldüğünde uygulamalı eğitim maliyetli olarak karşımıza çıkabilir. Bu da eğitim hayatında sanal gerçekliğin kullanılması için okulların bütçesini zorlayabilir. Bu durumda okullara mali açıdan destek çıkılmalıdır. Okullar için sanal gerçeklik sistemlerinin maliyeti azaltılmalıdır. Yine de maddi gücü yetmeyen okullar olursa bu okullar pahalı olmayan masa üstü sanal gerçeklik uygulamaları önerilebilir.

İşyerlerinde de işverenler eğitim maliyetinden kaçmamalıdır. Eğer eğitim eksikliğinden dolayı bir kaza meydana gelirse bu kaza mali açıdan daha sarsıcı olacak ve buna ek olarak hukuki açıdan daha büyük sorunlar doğuracaktır.

Öğretmenlerin ve eğitim verecek uzmanların bu programları kullanacak olan öğrencilere ve çalışanlara cihazı nasıl kullanacakları konusunda rehberlik etmeleri için bilgi ve tecrübe sahibi olması, bu tarzda uygulama çalışmalarına katılması gerekmektedir. Bu sayede öğretmen-öğrenci ya da uzman-işçi iletişimi de iyi yönde etkilenecektir.

Kişilerin gerçek ortamda gerçekleştiremeyecekleri tehlikeli ve riskli çalışmaları sanal gerçeklik cihazlarıyla deneyimleyebilmeleri için her sektöre ait sanal gerçeklik yazılımları artırılmalıdır. Oluşturulan bu yeni yazılımlar kişilerin kullanımı sırasında kendilerini yönlendirebildikleri, yanlış bir hareket sonrasında o anki çalışmanın tehlikesini yaşayabilecekleri şekilde olmalıdır. Bu sayede kişiler yaptıkları yanlış davranışların hangi sonuca (düşme, patlama vb.) yol açacağını bizzat kendileri yaşayarak öğrenecektir.

Eğitim sırasında bir öğrenci VR kullanırken diğerlerinin konudan kopmaması, bu yüzden de öğretmenlerin sınıf hâkimiyetini kaybetmemesi ve öğretmen-öğrenci ilişkisinin kötü etkilenmemesi için bireysel sanal gerçeklik sistemleri yerine öğrencilerin toplu olarak kullanabileceği sanal odalar gibi sistemlere yönelinebilir.

Teknolojik aletler genellikle öğrencilerde motivasyon oluşturmaktadır ve derse yönelik ilgiyi de arttırmaktadır. Yapılan çalışmanın bulguları da bunu destekler niteliktedir. Öğrencilerdeki bu ilgi ve motivenin de başarıyı olumlu etkileme potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışma kısa sürede gerçekleştirildiği için öğrenciler üzerindeki etkinin daha doğru yorumlanabilmesi için daha uzun vadeli çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda tek bir üniversitenin sınırlı sayıda öğrencisi ile gerçekleştirilen bu çalışma bir başlangıç çalışması olarak görülmeli, çeşitli üniversitelerde veya iş kurumlarında daha fazla katılımcıyla gerçekleştirilecek bu tarzdaki çalışmalar için bir ön çalışma olarak görülmesi temenni edilmektedir.

7. KAYNAKÇA

Aktamış, H., Arıcı, V. (2013). Sanal Gerçeklik Programlarının Astronomi Konularının Öğretiminde Kullanılmasının Akademik Başarı ve Kalıcılığa Etkisi. Mersin Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 9 (2), 58-70. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/mersinefd/issue/17383/181566>

Arıcı, V. A. (2013). Fen Eğitiminde Sanal Gerçeklik Programları Üzerine Bir Çalışma: Güneş Sistemi ve Ötesi: Uzay Bilmecesi Ünitesi Örneği. Retrieved from <http://adudspace.adu.edu.tr:8080/xmlui/handle/11607/1297>

Başaran, F. (2010). Öğretmen Adaylarının Eğitiminde Sanal Gerçeklik Kullanımına İlişkin Görüşleri Sakarya Üniversitesi Böte Örneği. Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya.

Bayraktar, E., Kaleli, F., (2007). Sanal Gerçeklik ve Uygulama Alanları. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya. Retrieved from https://ab.org.tr/ab07/kitap/bayraktar_kaleli_AB07.pdf

Burke, M.J., Sarpy, S.A., Smith-Crowe, K., Chan-Serafin, S., Salvador, R.O., Islam, G. (2006). Relative effectiveness of worker safety and health training methods. American Journal of Public Health, 96(2), 315-324. Retrieved from

https://www.researchgate.net/profile/Gazi_Islam/publication/7389972_Relative_Effectiveness_of_Worker_Safety_and_Health_Training_Methods/links/0fcfd5148cd3723267000000/Relative-Effectiveness-of-Worker-Safety-and-Health-Training-Methods.pdf

Bütün, M., Budak, V., Selçuk, M., Emre, İ., Şimşek, İ. (2019). Eğitimde Sanal Gerçeklik Uygulamalarında Erişilebilirlik Ve Uyumluluk. Eğitim Teknolojisi Kuram ve Uygulama, 9 (1) , 251-275. doi: 10.17943/etku.454758

Cha, M., Han, S., Lee, J., & Choi, B. (2012). A virtual reality based fire training simulator integrated with fire dynamics data. Fire Safety Journal, 50, 12–24. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/143868362.pdf>

Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul Ve Esasları Hakkında Yönetmelik, (2013). Retrieved from <https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?Mevzuatkod=7.5.18371&Mevzuat%C4%B1liski=0&Sourcexmlsearch>.

Çiftçi, B. (2016). Türkiye’de Toplumsal Kültürün İş Güvenliği Kültürüne Etkisi. Çalışma İlişkileri Dergisi, 7 (2), 13-40. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/308081>

Deryakulu, D. (1999). Çağdaş Eğitimde Yeni Teknolojiler, Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, No. 1021.

Ekemen, S. (2006). Eski ve Yeni İş Kanunlarında Çalışanların İsg Eğitimi, İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 30, 12-17.

Eschenbrenner, B., Nah, F.F., & Siau, K. (2008). 3-D virtual worlds in education: Applications, benefits, issues, and opportunities. Journal of Database Management, 19(4), 91–110. doi:10.4018/jdm.2008100106

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu No:6331, (2012). Retrieved from <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630-1.htm>.

Kale, U. (2010). Sanal Gerçeklik Türleri Nelerdir? Retrieved from <http://ugurkale26.blogspot.com/2010/02/Sanal-Gerceklik-Turleri-Nelerdir.Html>.

Kayapa, N. (2010). Gerçek ve Sanal Gerçeklik Ortamları Arasındaki Algısal Farklılıklarda Görselleştirmeye İlişkin Özelliklerin Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

Kızıl, M., Joy, O. (2009). What Can Virtual Reality Do For Safety. Minerals Industry Safety and Health Centre, The University of Queensland. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.8522&rep=rep1&type=pdf>

Lewis, T.M., Aggarwal, R., Rajaretnam, N., Grantcharov, T.P., & Darzi, A. (2011). Training in surgical oncology – The role of VR simulation. Surgical Oncology, 20(3), 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.suronc.2011.04.005>

Lucas, J., & Thabet, W. (2008). Implementation and evaluation of a VR task-based training tool for conveyor belt safety training. ITcon, 13(special issue), 637–659. Retrieved from https://www.itcon.org/papers/2008_40.content.09404.pdf

Manca, D., Brambilla, S., & Colombo, S. (2013). Bridging between virtual reality and accident simulation for training of process-industry operators. Advances in Engineering Software, 55, 1–9. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.advengsoft.2012.09.002>

Öngöz, S., Karal, H., Tüysüz, M., Yıldız A., Kılıç A., (2017). Development of Three Dimensional Virtual Court for Legal Education. Turkish Online Journal Of Qualitative Inquiry, 8(1), 69-90. doi: 10.17569/tojqi.288854

Özdemir, M. (2016). Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi İle Öğrenmeye Yönelik Deneysel Çalışmalar: Sistematik Bir İnceleme. Mersin Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 133(2). doi: <http://dx.doi.org/10.17860/mersinefd.336746>

SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARININ İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMLERİNE ETKİSİ

Özdemir, O., Erbaş, D., Yucesoy, O. S. (2019). Özel Eğitimde Sanal Gerçeklik Uygulamaları. Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Özel Eğitim Dergisi, 20, 1-26. doi: 10.21565/ozelegitimdergisi.448322

Sürücü, O. (2017). Sanal Gerçekliğin Kültürel Mirası Korumada Kullanımı Salih Bozok Villası Örneği. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

Topuz, Y. (2018). Anatomi Eğitiminde Sanal Gerçeklik ve Üç Boyutlu Masaüstü Materyallerin Akademik Başarı ve Bilişsel Yük Açısından Karşılaştırılması. Marmara Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

Yamamoto, G., Zümrüt, N., Altun, D. (2018). İş Kazalarının Önlenmesinde Sanal Gerçeklik Teknolojisi İle Deneysel Öğrenme. Uluslararası İşletme Ve Pazarlama Kongresi. Retrieved from <https://www.okan.edu.tr/uploads/pages/ogrencilerimizin-ulusal-ve-uluslararası-akademik-yayinlari/is-kazalarinin-onlenmesinde-sanal-gerceklik-teknolojisi-ile-deneysel-ogrenme.pdf>

Zafer, D. Z. (2007). Mimari Tasarım Sürecine Sanal Gerçeklik Teknolojilerinin Etkisi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Zhao D., Lucas J. (2015). Virtual reality simulation for construction safety promotion. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, 22:1, 57-67, doi: 10.1080/17457300.2013.861853

KAPLAMA ENDÜSTRİSİNDE EPOKSİ REÇİNE VE SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI

Nil Acaralı *

* Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul

nilbaran@gmail.com

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Epoksi reçineleri, geçmişten bu yana uzun yıllardır kullanılmaktadır ve günümüzde özellikle teknik avantajların biraz daha yüksek maliyetlerini garanti ettiği birçok büyük endüstriyel uygulamaya sahiptir. Bu reçinelerin kimyası, büyüleyici ve birçok yetenekli bilim adamı tarafından çalışmalara konu olmuştur. Epoksi reçinelerinin teknolojik uygulamaları çok talepkâr olup her yıl birçok yeni gelişmeye konu olmaktadır. Epoksi reçineleri, esas olarak reçinenin, çapraz bağlama maddesinin uygun şekilde seçilmesi, kürlenmiş epoksi reçinesinin özelliklerinin, spesifik performans özellikleri elde edecek şekilde uyarlanmasına izin verdiği için geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu çok yönlülük, epoksi reçinelerinin yıllar içinde istikrarlı büyüme hızında önemli bir faktör olmuştur.

Epoksi reçineler, çok iyi elektriksel özellikleri, kimyasal dirençleri, iyi mukavemetleri ve düşük nem emilimi ile karakterize edilmektedir. Korozyona, yüksek mukavemet/ağırlık oranına ve yapışma özelliklerine karşı mükemmel direnç sağlayan çok yönlü reçinelerdir. Reçinelerin viskozitesi nispeten yüksektir, genellikle 50-100°C arasındaki sıcaklıklarda kalıplanırlar. Epoksiler, havacılık ve savunma, kimyasal tesis ve yüksek performanslı otomotiv uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kürlenmiş epoksi sistemleri, kimyasal stabilite açısından reçine ve sertleştirici seçimine bağlı sistemlerdir. Epoksi reçine ve kürlenme ajanının uygun seçimi bu noktada önem arz etmektedir.

Epoksi reçineleri iki parçadan oluşur: reçine ve sertleştirici. İki parça birlikte karıştırıldığında, ısı üretimine neden olan kimyasal bir reaksiyon meydana gelir. Bu ısı, epoksiyi bir sıvıdan bir katıya dönüştürür. Epoksi reçine, diğer reçineler gibi, reçineden sertleştiriciye belirli bir oranda veya miktarda karıştırılır. Reçine, kürlenme süresine (epoksinin tamamen sertleşmesi için gereken süre) karşı reçine süresi (reçinenin hala yeterince sıvı olduğu süre) vardır. Her epoksi reçinesi farklıdır. Düzgün kürlenme için, reçinenin doğru oranlarda iyice karıştırılması gerekir.

Epoksi reçine üretiminin yaklaşık yarısı yüzey kaplama uygulamaları için kullanılırken, geri kalanı elektronik uygulamalar, inşaat sektörü ve çeşitli kullanımlar arasında yaklaşık olarak eşit olarak bölünmüştür.

Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında bir çalışmada, bir epoksi reçine sisteminin ve suya maruz kalan grafit/epoksi kompozit sisteminin termal genleşme ve şişme davranışının ölçüldüğü deneylerin sonuçları sunulmuştur. Sertleşen epoksi reçinesinin emilen suyun hacminden biraz daha az bir miktarda şiştiği ve suyun şişme etkinliğinin polimerin nem içeriğine göre değiştiği bulunmuştur. Ayrıca, su ile doymuş kürlenmiş epoksi reçinesinin ısı genleşmesinin kuru reçinenin iki katından daha fazla olduğu gözlenmektedir. Sonuçlar ayrıca 95°C'de %7.1 su ile doyurulmuş kürlenmiş reçinenin 1°C suya yerleştirildiğinde nem içeriğininde hızla %8.5'e çıkacağını göstermektedir (Adamson, 1980).

Yapılan başka bir çalışmada, iki kür çevrimi kullanılarak farklı miktarlarda metafenilen diamini ile sertleştirilen bir Bisfenol-A tipi iki işlevli epoksi reçinesinin gerilme mekanik özellikleri ve kırılma tokluğu belli bir sıcaklık aralığında belirlenmiştir. Çekme mukavemeti, kopma uzaması ve tokluk gibi büyük gerilme özellikleri, kimyasal yapı, moleküler mimari, moleküller arası paketleme ve

çapraz bağ yoğunluğuna daha karmaşık bir bağımlılık göstermiştir. Gevşeme işlemlerinin mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynadığı vurgulanmıştır (Gupta vd. 1985).

2. BOYA KAPLAMALAR

Teknolojinin ve endüstrinin hızla ilerlemesi sonucunda günlük hayatımızda geniş bir yer tutan boya, farklı özellikleri sürekli iyileştirilerek gerekli olan ihtiyaçlara cevap vermesi için üzerinde devamlı çalışılan bir konu olmuştur. Farklı kaynaklarda değişik şekillerde tanımlanan boya; yüzeylerin dış etkilerden korunması ve estetik görünüm kazandırılması amacıyla kullanılan, renkli ve renksiz seçenekleri bulunan koloidal bir çözeltilidir (Kayran, 2013).

Boyaların çoğunluğu istenilen yüzeylerin kaplanması için kullanılmaktadır. Ahşap ürünler, metal malzemeler, duvar, zemin gibi dış cepheler boyanın genel olarak kaplama görevinde kullanıldığı yüzeylerdir. Bu kaplama göreviyle uygulandığı yüzeylerin yanı sıra özellikle üretim/imalat sektöründe çeşitli malzemelerin renklenmesi gıda sanayisinde renklendirici ve baskı sanayisinde de pek çok renklendirme görevinde boyalar kullanılmaktadır (Akgür, 2003).

Boya sektörüne genel olarak bakıldığında inşaat boya ve sanayi boya olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Tanım ve ayırım boya sektöründe zordur ancak tanımlama yapılacaksa temel olarak boyanın uygulanmak istediği yüzey hedef alınır ve tanımlama bu şekilde yapılır. Boya yapılacağı zaman hem kaliteyi etkileyecek parametreler hem de çevre riski, güvenlik riski ve sağlığı etkileyecek unsurlar önemli ise bu boya literatür tanımlamasında sanayi boyası kategorisine girmektedir. Boya sektöründeki uygulamalardan biri olan sanayi boya uygulamalarında üzerine boya uygulanacak madde, boyanın yapılacağı yere gitmektedir. Sanayi boya olarak inşaat boya uygulamalarında yüzeyin bulunduğu yerde boya uygulaması yapılmaktadır. Sanayi boya uygulamalarının aksine inşaat boya uygulamalarında yüzeyin boyanacağı yere boya gitmektedir. İnşaat boya olarak sektör içerisinde tek bölüm kapsamında ele alınırlar. Sanayi boya ise farklı alt sektörler halinde sınıflandırılmaktadır. Sanayi boya uygulamalarının alt sektörleriyle ilgili açıklamalar genel olarak belirtilmiştir.

- Uçak, tren, otomobil, motosiklet, bisiklet, ticari taşıtlar gibi örneklerin de bulunduğu çeşitli taşıt yüzeylerinin boyanmasında taşıt boya uygulamaları kullanılmaktadır. Taşıtların yüzeylerinin boyanmasında yani orijinal boyama süreçlerinde, taşıtlarda bulunan çeşitli parçaların boyanmasında, takımlarında sanayi boya uygulamaları kullanılmaktadır.

- Sanayi boya uygulamaları yüzeyi metal olan ürünler üzerine yani dayanıklı olan tüketim ürünleri, motora sahip tarım araçları, trafolar, metal ürünler, çeşitli makineler ofis aletleri, iş aletleri gibi pek çok alete uygulanmaktadır.

- Çeşitli yüzeylerin koruma işlemini gerçekleştirmek için koruyucu boya uygulamalarının kullanımı tercih edilmektedir. Dış ortamdan etkilenen çeşitli ürünlere genelde dış cephe için kullanılan malzemelere koruyucu boya uygulamaları uygulanmaktadır.

- Boya çeşitlerinden biri olan toz boya uygulamalarının kullanımı mikron boyutlara getirilmiş haldedir. Toz boya uygulamaları, mikron boyuta getirilmiş boya uygulamaları olarak kullanılmaktadır. Sanayi alanında kullanımı çok yaygın olan toz boya uygulamaları otomobil sanayisinde de otomobillerin dış yüzeyleri için tercih edilen boya çeşitlerinden olmaktadır.

- Ürünlerde yenileme amaçlı kullanılan oto tamir boya uygulamaları hasara uğramış ya da boyanmasıyla ilgili sıkıntı olan araçlarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanım alanına göre aracın tümü veya hasar görmüş bölgesi olarak uygulamak mümkündür.

- İnşaat boya uygulamalarında bulunan boya uygulamalarından biri de ahşap boya uygulamalarıdır. Kullanım alanları genellikle; kapılar, yüzeyi ahşap olan eşyalar, çeşitli bina yapıları gibi yerlerdir. Boya nerede yapılacaksa ürünler oraya taşınır ve ilgili boyama işlemi bittikten sonra tekrar geri taşınır.

- Denize taşıtlarında genel olarak farklı boya çeşitlerinden deniz boyası uygulamaları kullanılmaktadır. Deniz suyunun taşıtları çok aşındırması sebebiyle dayanıklılık gibi direnç özelliklerine sahip boya uygulamalarıdır (Altun, 2017).

KAPLAMA ENDÜSTRİSİNDE EPOKSİ REÇİNE VE SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI

Boyanın temel bileşenlerini oluşturan maddeler; çözücü, bağlayıcı, pigment (renk veren dolgu maddeleri), katkı maddeleri olarak sınıflandırılır (Lambourne, 1987).

Bağlayıcılar; boyanın uygulandığı yüzeye bağlanmayı sağlarken bir de yüksek molekül ağırlıklı uzun polimer zincirleri olup renk verenleri, boyanın içindeki diğer maddeleri bir arada tutmayı sağlar. Renk verenler, bağlayıcının içinde ince toz tanecikleri halinde dağılmış vaziyette bulunan, boya içerisinde renklendirme, dolgu, örtücülük ve başka spesifik amaçlar için kullanılan çoğu zaman inorganik temelli katı maddelerdir. Çözücüler; boyanın reolojisini uygun bir şekilde ayarlamayı sağlayarak boyanın yüzeye sürülebilmesini sağlar. Aynı zamanda boyanın içinde bulunan çeşitli maddeleri bir arada tutar. Katkı maddeleri boyanın üretiminde, depolanmasında ve uygulanmasında önemli rolleri bulunan hammaddelerdir (Çelebisoy, 2007).

Uzun zincirli polimerlerden meydana gelen bağlayıcılar, boyanın uygulanacağı zemine tutunmasını diğer bir deyişle yapışmasını sağlar. Boyanın ana bileşimi bağlayıcı maddenin diğerleriyle birlikte reaksiyona girmesi sonucu oluşmaktadır. Bu sebepten ötürü bağlayıcının içeriği boyanın bütün niteliklerini değişimi söz konusudur. Boyanın dayanımının artması konusunda da bağlayıcının etkisi büyüktür. Bağlayıcının geçiş sıcaklığı ne kadar fazlaysa boyanın dış darbeye dayanımı fazla olur. Bağlayıcının iyi yapışması ise moleküllerin bağlanması ile alakalı olup genellikle istenen düz zincirli yapıdır. Bağlayıcının molekül ağırlığının etkisi ise şu şekildedir: Boyanın daha iyi dayanım göstermesi ve hızlı kurumasını sağlamaktadır. Bağlayıcılar kısaca boyanın dayanım, esneklik, kuruma süresi özelliklerine katkıda bulunur. Bağlayıcılara akrilik reçine, vinil reçine bunların kopolimerleri verilebilir (Gündüz, 2005).

Katkı maddeleri; boyanın içerisinde az miktarda bulunan, fakat boyanın özelliklerini kayda değer boyutta değiştiren komponentlerdir. Basit inorganikler maddelerden oluşabildikleri gibi karmaşık yapıları farklı yapıları da içerebilmektedirler. Katkı maddelerine örnek olarak verilebilen maddeler arasında kalınlaştırıcılar, bakteri kırınlar, alev geciktiriciler ve dispersiyon ajanları vardır (Rothenberg, 1978).

Katkı maddeleri boyaya çok düşük oranda katılmasına rağmen belirgin değişikliklere neden olur. İlave edilmiş nedenleri ıslatma, kolay dağılma, kurutma alışkanlığını kontrol, ultraviyole ışınının etkisinden koruma, biyolojik parçalanmaya karşı dayanıklılık kazanma, renk ve yüzey güzelleştirme olarak sıralanabilir. Birçok katkı maddesi, yüzey aktif madde karakterinde olup, pigment bağlayıcı ara fazında veya yakınında yer alarak bu konumları nedeniyle küçük oranlar da bile büyük değişikliklere neden olmaktadır (Vural, 1997).

Diğer bir anlamda, katkı maddeleri boyanın tüm proses aşamalarında önemli etkilere sahip hammaddelerdendir. Üretim ve depolanma esnasında çeşitli katkı maddeleri ile boyanın çökme, akma herhangi köpük oluşturma gibi dezavantajları ortadan kaldırmıştır.

Katkı maddelerinden yapışmayı arttıranlar ile boyadaki polimerin yüzeye daha iyi tutunması sağlanır. Buna ek olarak kendi içinde özel etkinlikleri olan katkı maddeleri de mevcuttur. Bu etkenlerin tümü boyanın ne kadar başarılı olduğunu etkileyen parametrelerdir. Çözücü yani incelticiler ise hem boya reolojisinin uygun bir şekilde ayarlayarak boyanın istenilen yüzey üzerine sürülmesini sağlar hem de boya içerisindeki maddeleri bir arada tutar. Yüzeye sürülen boya içerisinden çözücü tamamen uçar ve geri kalan maddeler film halinde yüzeyde oluşur. Bu yüzde çözücünün durumu uygulanacak boyanın yayılmasını, yapışma gücünü ve kuruma zamanını etkiler. Çözücünün buharlaşma hızı, boyanın hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Çözücünün erken buharlaşması demek boyanın yayılma özelliğinin ortadan kalkması demektir. Fakat tersi durum olarak geç buharlaşırsa boya yüzeyde akma yapar. Bu durumda boyanın üstte kalan kısımları ince olurken altta kalan kısımları daha kalın olur. Su bazlı boyalarda havanın neminin buharlaşma hızına etkisi oldukça yüksektir. Bunun sebebi ise havada artan nemin suyun buharlaşmasını engellemesidir (Bekircan, 2007).

Boyayı oluşturan bileşenlerin tipi ve oranı da boyanın özelliğini belirtmektedir. Aynı zamanda boyanın çeşitli bileşenleri, boya üretim prosesinde ve uygulamada oluşacak potansiyel çevre tehlikesi ile mevcut atık yönetim seçeneklerini de içine alan atığın niteliğini belirlemektedir. Atıkların minimuma indirilmesi ve kontrolü açısından boyalar en uygun içerdikleri çözücüye bakılarak

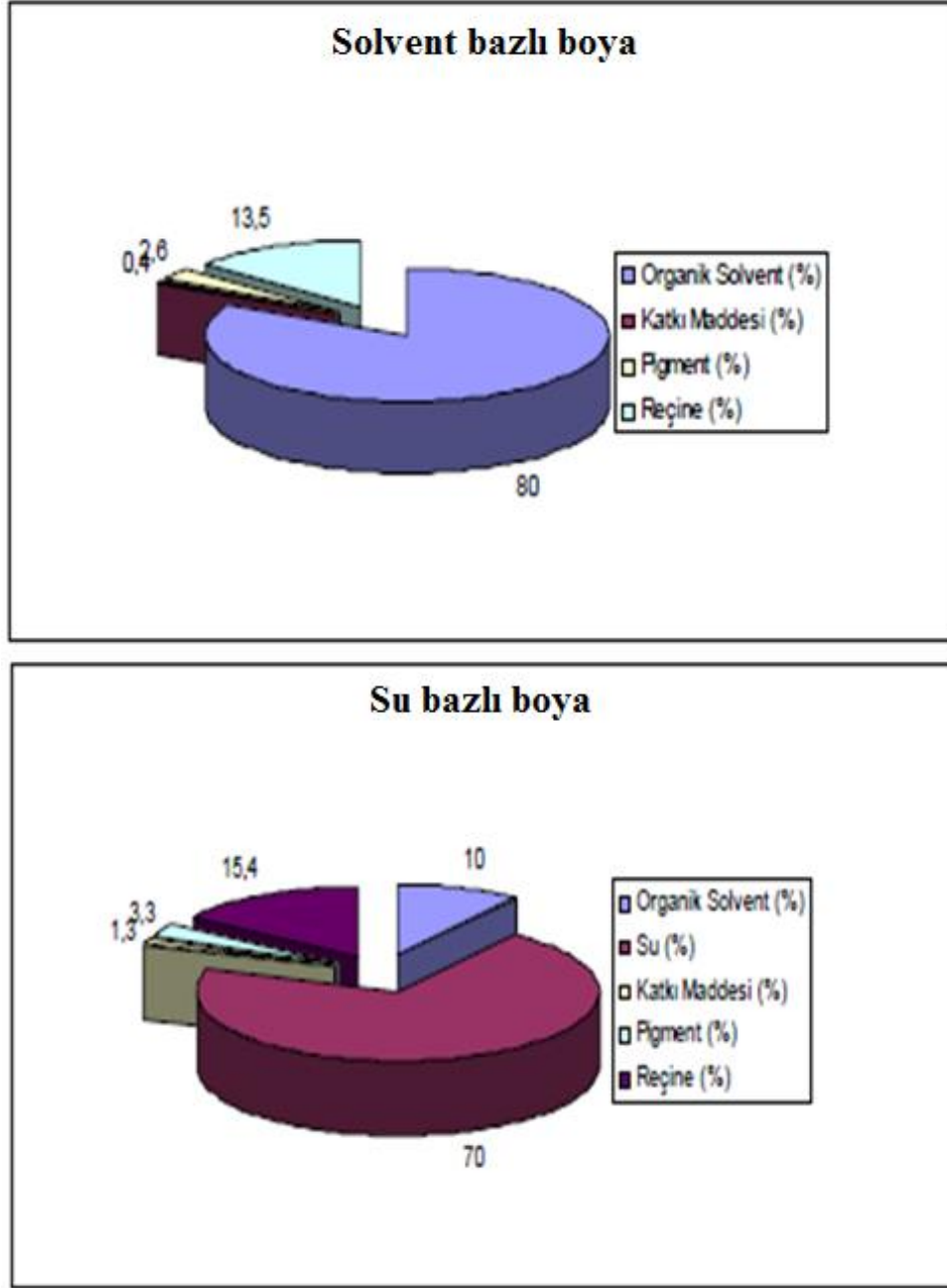
KAPLAMA ENDÜSTRİSİNDE EPOKSİ REÇİNE VE SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI

sınıflandırılmaktadır. Bu açıdan boyalar, su bazlı, solvent bazlı ve toz boyalar kuru, çözücü içermeyen olarak sınıflandırılabilir (Kavaklı, 2004).

Pigmentler, boyaların renklendirilmesi ve pas önleme işlevini kazanması için kullanılan hammadde grubudur. Pigmentler, prensip olarak boyalarda kullanılan çözücülerde çözünmezler. Buna karşılık boya çözücü ve bağlayıcılarının oluşturduğu sıvı ortam içinde kararlı bir şekilde yayılmış mikron boyutlu katı asıtlılar halinde homojen biçimde yayılması boya üretiminin en kritik adımını oluşturur (Ökenek, 2013).

Şekil 1’de görüldüğü gibi solvent bazlı boyanın yarısından çoğu organik, su bazlı boyanın ise yarısından çoğu su esastır.

Türkiye’de boya üretim prosesinde çözücü olarak genelde solventler tercih edilmektedir. Birçok ülkede, çevre ve insan sağlığına verilen önemin artmasıyla birlikte solvent kullanımının azaltılmasına yönelik çalışmalar başlatılmıştır ve yaygın bir şekilde devam etmektedir. Solvent bazlı boyaların kullanımından kaynaklanarak atmosfere yayılan organik uçucu bileşiklerin yüksek seviyelerde bulunduğu göz önüne alındığında, su bazlı boya sistemlerinin önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır (Balık, 2013) (Şekil 1).



Şekil 1: Organik bazlı boyayla su bazlı boyanın karşılaştırılması (Balık, 2013)

Diğer bir deyişle, su bazlı sistemler, organik çözücü içeren sistemler, sıvı halde kullanıldıktan bir süre sonra yüzey üzerinde kurumaya başlarken, içlerinde önemli bir yüzde olarak barındırdıkları solventler, serbest halde atmosfere geçerek büyük ölçüde tehlike yaratmaktadırlar. Buharlaştıran solventler, güneş ışınları etkisi ile azot oksit oluşturmaya girerek atmosferin yüzeye yakın kısımlarında hava kirliliğine yol açmaktadırlar. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde su ile inceltilen yeni boya ve vernik sistemleri geliştirilmekte ve yıllar içinde artan bir yüzde ile solvent bazlı sistemlere kısıtlamalar getirilmektedir (Ceylan, 2001).

Ayrıca, su bazlı boyalar, daha uzun kullanım ömrüne sahiptirler ve yağlı boyalarla kıyaslandığında parlaklıklarını kaybetmezler. Sararma gibi problemleri veya üst üste birden fazla kat uygulandığında çatılma problemleri genelde söz konusu olmaz. Solvent bazlı boyalar veya yağlı boyalar, uygulama sonrasında en azından bir hafta süreyle koku yapan, boya yapılan alanı kısa sürede kullanıma açamayan boyalardır. Fakat, su bazlı boyalar, uygulama alanlarının kısa sürede kullanıma

açılmasına olanak tanır. Su bazlı boya üretim prosesinde, solvent yerine isminden de anlaşıldığı üzere çözücü olarak su kullanılmaktadır. Günümüzde, daha çok duvar boyası olarak su bazlı boyalar olan saten, plastik, vb. boyalar tercih edilmektedir. Boya üretim prosesinde, hammaddeler karıştırılarak boya pastası elde edilir. Hazırlanan boya pastasına su bazlı boya üretim prosesinde ilk aşamayı teşkil eden dispersiyon işlemi uygulanır. Dispersiyondan sonraki işlem ise bağlayıcı verme işlemidir. Bağlayıcı verme aşamasında, hazırlanan karışıma sırasıyla; reçine, koruyucu ve köpük önleyici ajanlar gibi katkı maddeleri katılır. Bağlayıcı verme işleminin ardından renklendirme işlemi yapılır. Astar su bazlı boya üretiminde renklendirme işlemi yapmaya gerek yoktur. Son kat su bazlı boyalarda hazır bulunan renk pastaları prosese giriş yapar ve böylece boya hedeflenen renge kavuşmuş olur. Renklendirme işleminden sonra elde edilen karışım filtrelemlere alınır. Burada, filtrasyonun amacı boyaya ilave edilmiş olan silt, kireç gibi toz hammaddelerin oluşturduğu partiküllerin karışımdan arındırılmasıdır. Dış cephe boyalarına bakıldığında, bu boyalar filtrasyon işlemine tabi tutulmaz ve böylece yüzeyde istenen pürüzlülük sağlanmış olur. İç cephe su bazlı boyalarda ise filtrasyon işlemi uygulanır ve bundan sonra boyalar plastik kaplara doldurulmak üzere dolum bantlarına alınır (Kocabaş, 2009).

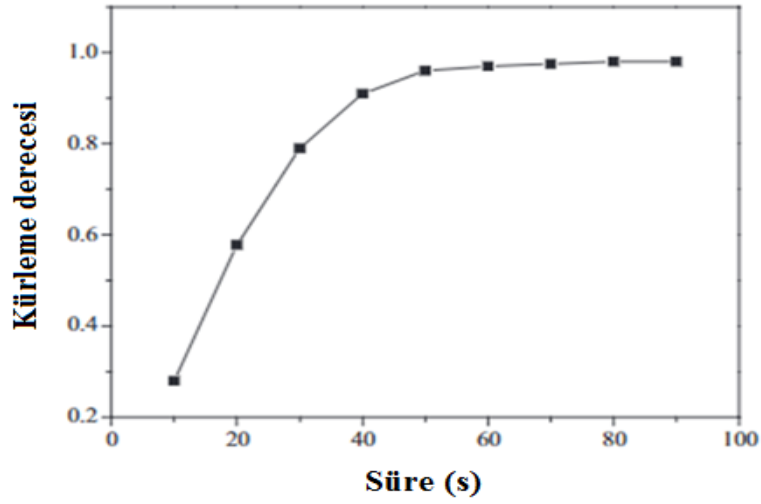
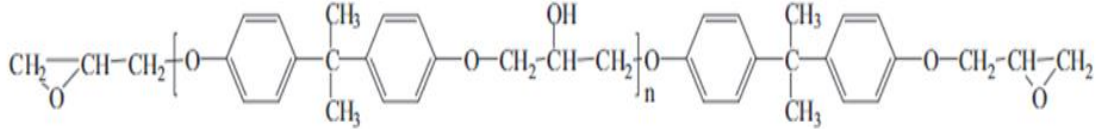
3. REÇİNELER

Alkid reçinesi, sentetik polimerlerin yüzey kaplama teknolojisindeki ilk uygulamalarından biri olup yağ veya yağdan türetilmiş yağ asitlerinin kimyasal olarak bir polyester polimer yapısında birleştirilmesinde başarılı olmuştur. Faydaları, bu araçların mekanik özelliklerinin, kuruma hızının ve dayanıklılığının, yağların kendilerinin ve mevcut olan oleoresinli araçların üzerinde artırılmasıydı. Tokluğu arttırmak veya reolojiyi değiştirmek için isteğe bağlı olarak diğer modifiye edilmiş alkidlerle harmanlanmış uzun yağ alkidi, fırça uygulamalı solvent bazlı dekoratif kaplamalarda kullanılan ana reçine olarak kalır. Kimyasal anlamda, polyester terimi doymuş polyesterleri, doymamış polyesterleri ve alkidleri kapsar. Polyester reçineleri tipik olarak esas olarak birlikte reaksiyona giren di- veya polihidrik alkoller ve di- veya tri-bazik asit veya anhidritten oluşur ve normal çözücüler ile inceltir. Amino veya azot reçineleri, iki veya daha fazla amin grubuna, özellikle üre ve melamine sahip bazı bileşiklerin formaldehit ile yoğunlaştırma ürünleridir. Bu yoğunlaştırma ürünleri genellikle alkile edilir ve kısmen polimerize edilebilir. Kaplama endüstrisinin ilk yıllarında, doğal yağların özelliklerini geliştirmek için sadece doğal olarak oluşan reçineler mevcuttu. Bu yüzyılın başlarında, sert yağda çözünen fenolik formaldehit reçinesinin mevcudiyeti, vernik yapımına daha bilimsel bir yaklaşım sağlamıştır. Isıyla reaktif, çözünen fenolik reçinelerin geliştirilmesi de mükemmel çözücü ve korozyon direnci ile farklı endüstrilerin gelişmesini sağladı; bu reçineler hala tek başına ya da teneke kutu kaplamaları ve tank ve tambur kaplamaları için alkid ya da epoksi reçineleri ile karışım halinde bulunabilmektedir. Bununla birlikte, çoğu uygulama için ikincisinin çok daha üstün rengi nedeniyle amino reçineler tarafından çapraz bağlayıcı reçineler olarak yerini almıştır. Kaplamalarda, silikon-oksijen ve silikon-karbon bağı özellikle karardır ve bu, yarı organik silikon reçinelerinin davranışı üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir, böylece termal ayrışma ve oksidasyona karşı son derece dirençlidirler. Yüzey kaplamada, silikonla modifiye edilmiş polimerlerin hazırlanmasında kullanılmak üzere bir dizi reaktif silikon reçinesi mevcuttur ve bunlar hidroksi veya metoksi fonksiyonel olabilir. Kaplama malzemelerinde, epoksi veya oksiran grubunun, reçineleri sentezleme aracı olarak ve çapraz bağlama bağlayıcıları aracı olarak kullanımı, günümüzde yaygın olarak bilinmektedir. Epoksi reçine grubu, epiklorhidrin ve bisfenol A'nın reaksiyon ürünlerine dayanmaktadır (Lambourne ve Strivens, 1999) (Tablo 1).

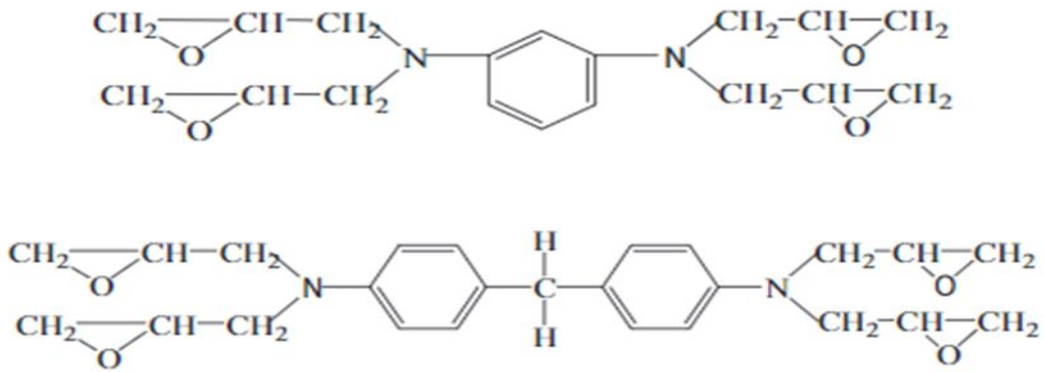
Bisfenol-A'nın (DGEBA) diglisidil eteri, epiklorhidrin'in abasik katalizör varlığında bisfenol-A ile reaksiyona sokulmasıyla üretilir. Şekil 2, DGEBA'nın kimyasal yapısını ve zamanın fonksiyonu olarak epoksi reçinenin kürlenme derecesi gösterir. DGEBA reçinesinin özellikleri tekrarlanan birimlerin sayısına bağlıdır. Düşük moleküler ağırlıklı moleküller sıvı olma eğilimi gösterirken, yüksek moleküler ağırlıklı moleküller daha viskoz akışkanlar veya katılar olma eğilimindedir. Farklı epoksi reçinelerin kimyasal yapıları ve epoksi reçinelerin kullanım alanları Şekil 3'te verilmiştir (Jin vd. 2015).

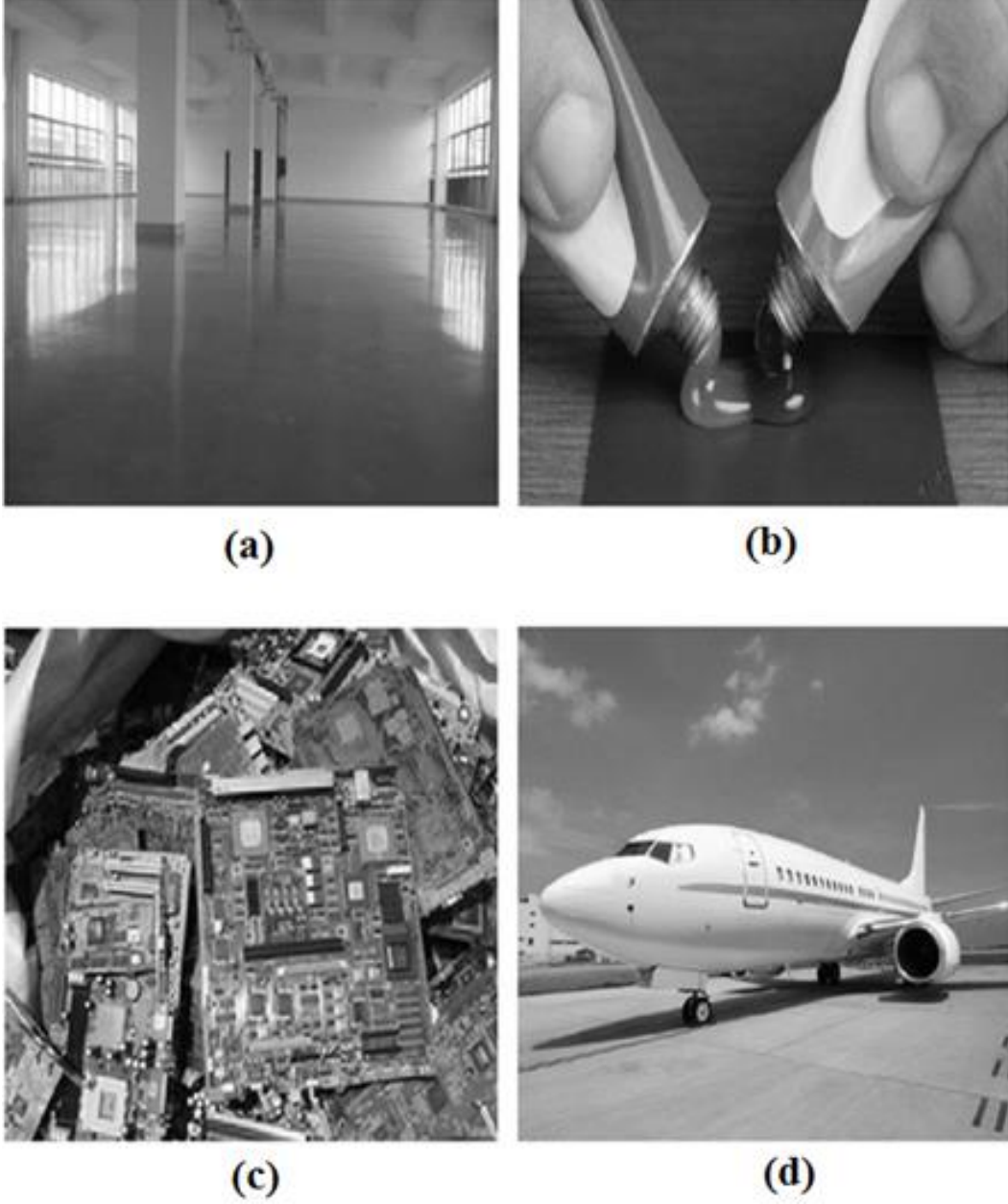
Tablo 1: Bazı tipik dolgu maddeleri (Lambourne ve Strivens, 1999)

Kimyasal	Tip
Kalsiyum karbonat	Kireçtaşı Kalsit
Kalsiyum sülfat	Alçıtaşı Anhidrit
Silikat	Silika Kil Pudra



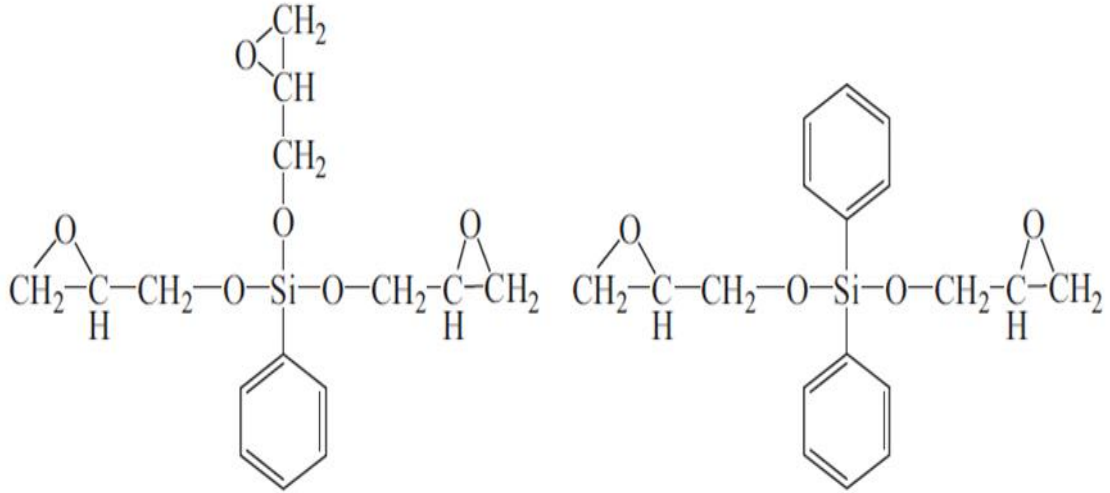
Şekil 2: DGEBA'nın kimyasal yapısı ve zamanın fonksiyonu olarak epoksi reçinenin kürlenme derecesi (Jin vd. 2015)





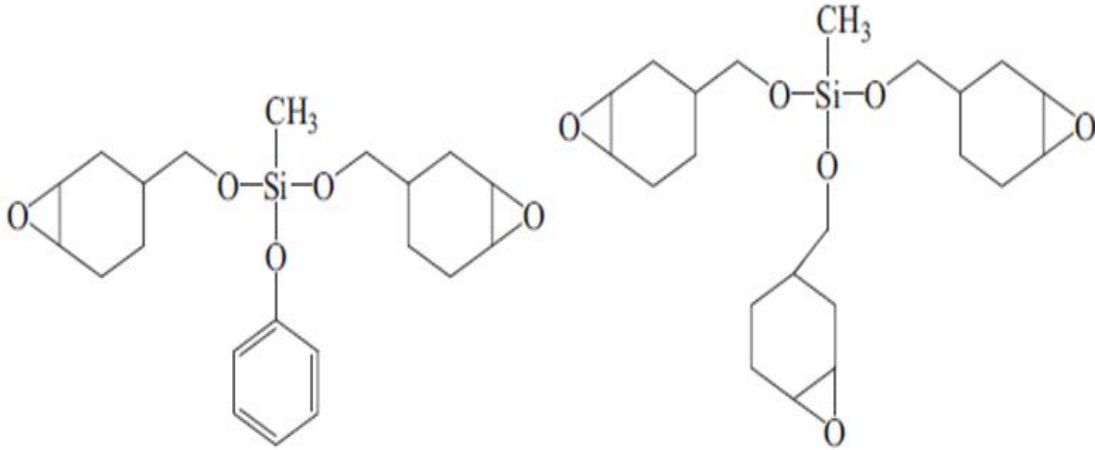
Şekil 3: Farklı epoksi reçinelerin kimyasal yapıları ve epoksi reçine örnekleri (a) Boya ve kaplama, (b) Yapıştırıcı, (c) Elektronik malzemeler ve (d) Havacılık endüstrisi (Jin vd. 2015)

Kimyasal açıdan bakıldığında, silikon, çevre dostu bir alevlendirici olarak kabul edilir, çünkü mevcut malzemeler ile çevre üzerinde daha az zararlı bir etkiye sahiptir. Mercado vd. (2006) bu açıdan silikon içeren epoksi reçineleri sentezlemişlerdir ve kimyasal yapıları Şekil 4'te gösterilmektedir.



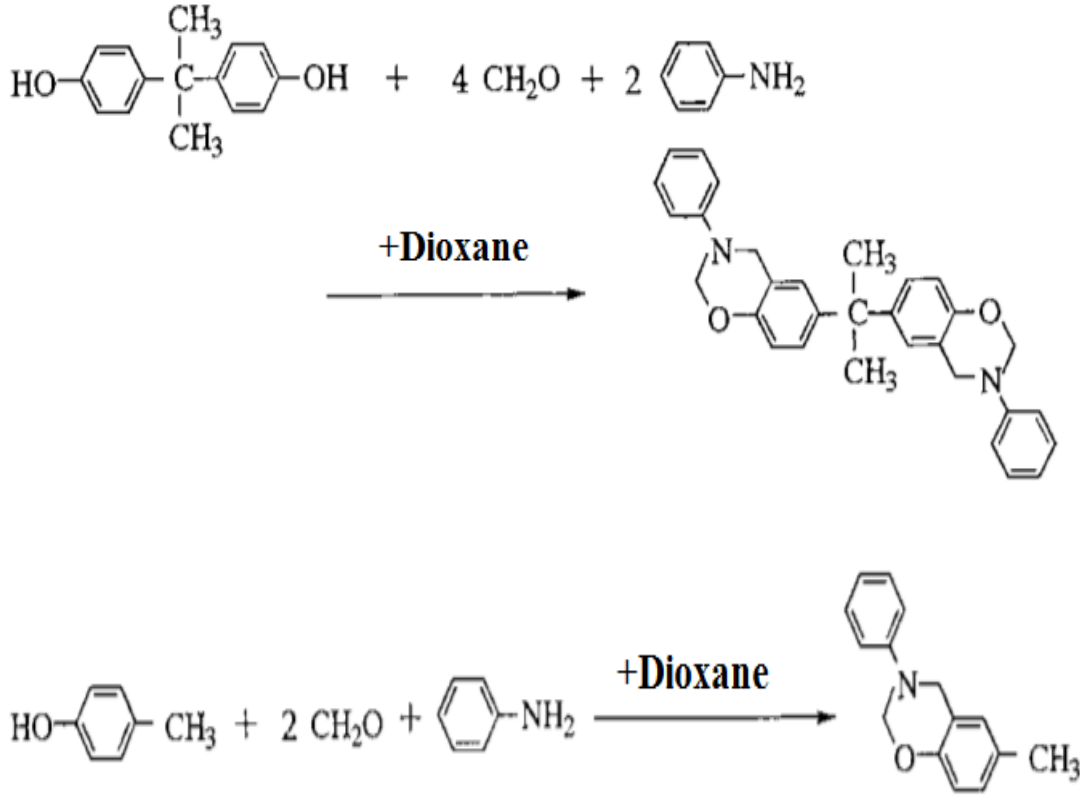
Şekil 4: Silikon içeren epoksi reçinenin kimyasal yapısı (Mercado vd. 2006)

Literatürde yapılan farklı bir çalışmada, Liu vd. (2012) silikon içeren sikloalifatik epoksi reçineleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Şekil 5).



Şekil 5: Silikon içeren farklı bir epoksi reçine türünün kimyasal yapısı (Liu vd. 2012)

Yapılan diğer bir çalışmada ise Benzoxazine esaslı Bisfenol A ile kürlenene epoksi reçine tipi çalışılmıştır. Bisfenol A bazlı bir Benzoxazine, bisfenol A, formalin ve anilinden hazırlanmıştır. Bu Benzoxazine, epoksi reçinesinin sertleştiricisi olarak kullanılmıştır. Epoksi reçinesinin sertleşme davranışı ve sertleşen reçinenin özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, sertleştirme reaksiyonu bir sertleşme hızlandırıcısı olmadan devam etmiştir. Kalıplama bileşiği, 1507°C'nin altında, enjeksiyonlu kalıplama silindirindeki sıcaklığa karşılık gelen iyi bir termal kararlılık göstermiştir. 1507°C'nin üzerinde, sertleştirme reaksiyonu hızla ilerlemiştir. Sertleşen epoksi reçinesi, bisfenol A tipi bir madde ile sertleştirilen epoksi reçinesi ile karşılaştırıldığında iyi ısı direnci, su direnci, elektrik yalıtımı ve mekanik özellikler göstermiştir. Benzoxazine ve p-cresol esaslı benzoxazine sentezi Şekil 6'de gösterilmiştir (Kimura vd. 1998).



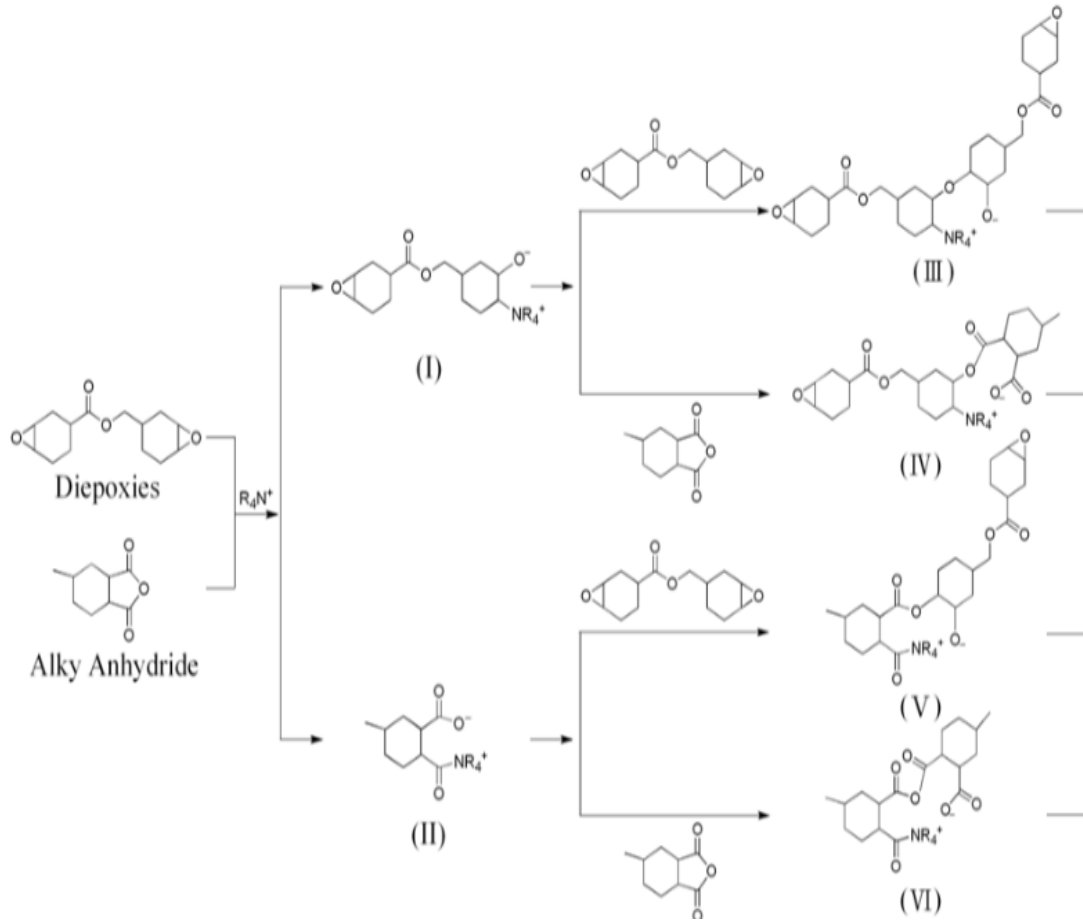
Şekil 6. Benzoxazine ve p-cresol esaslı benzoxazine sentezi (Kimura vd. 1998)

Anhidrit ve alifatik epoksi reçinenin bir amin tuzu katalizörü ile kürlenme mekanizması Şekil 7'de görülmektedir (Lin vd. 2010).

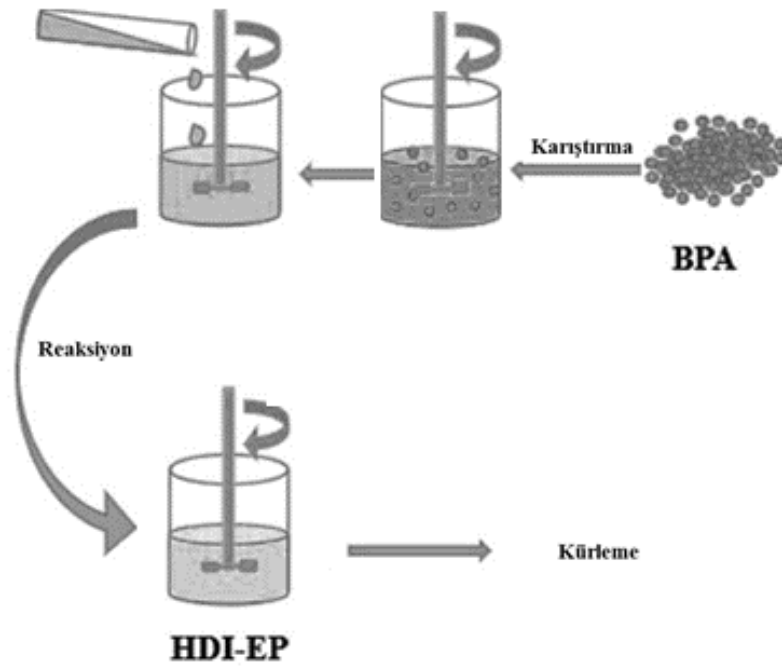
Sertleştirme işleminin ilk aşamalarında, prensip olarak, epoksi veya sertleştirici gruplarının konsantrasyonunu kromatografik yöntemlerle belirlemek mümkündür. Bununla birlikte, farklı reaktif fonksiyonel grupların varlığı izleme sürecini zorlaştırabilir. Tüm numunenin çözülmesini içeren yöntemleri kullanmak pek mümkün olmayabilir. Kürlenme bir ağın oluşumunu içerdiğinden, kürenme muamelesi ile reçinenin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler, zaman ve sıcaklık da önemli olduğundan kimyasal reaksiyonun kapsamını belirlemek yeterli değildir. Bu fonksiyonları izlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Hamerton, 1996).

- i) Mevcut reaksiyon grupları üzerindeki konsantrasyonların doğrudan analizi,
- ii) Kimyasal reaksiyonun derecesinin dolaylı tahmini,
- iii) Polimerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişikliklerin ölçülmesi

Yapılan bir çalışmada, derz dolgu malzemesi için epoksi reçinesinin tokluğunu arttırmak amacıyla, esnek heksametilen diizosiyanat (HDI), kopolimerizasyon yöntemi ile yüksek tokluğa sahip yeni bir tür epoksi reçinesi üretmek için kullanılmıştır. Bisfenol A epoksi reçinesi hazırlama prosedüründe, bisfenol A (BPA) ve epiklorohidrin (ECH) arasındaki reaksiyondan önce, esnek segmentlerin epoksi reçine zincirine gömülmesi için BPA ile reaksiyona sokulması, ardından modifiye epoksi reçine (HDI/EP) üretilmiştir. Mekanik özellikler, özellikle HDI/EP'nin dayanıklılığı önemli ölçüde artmıştır. Ek olarak, sıkıştırılmış örnekler birkaç dakika içinde orijinal şekline tamamen geri dönebilmiştir. Aynı çalışmada, HDI/EP numunesinin termal performansı ve korozyon direnci de araştırılmış, bu da numunenin 258°C'nin altında kullanılabilirliğini göstermiştir. Mevcut çalışma, birçok teknolojiye kullanılacak yüksek tokluğa sahip bir epoksi reçinesi hazırlamak için uygun bir yol göstermektedir (Şekil 8) (Zhang vd. 2019).

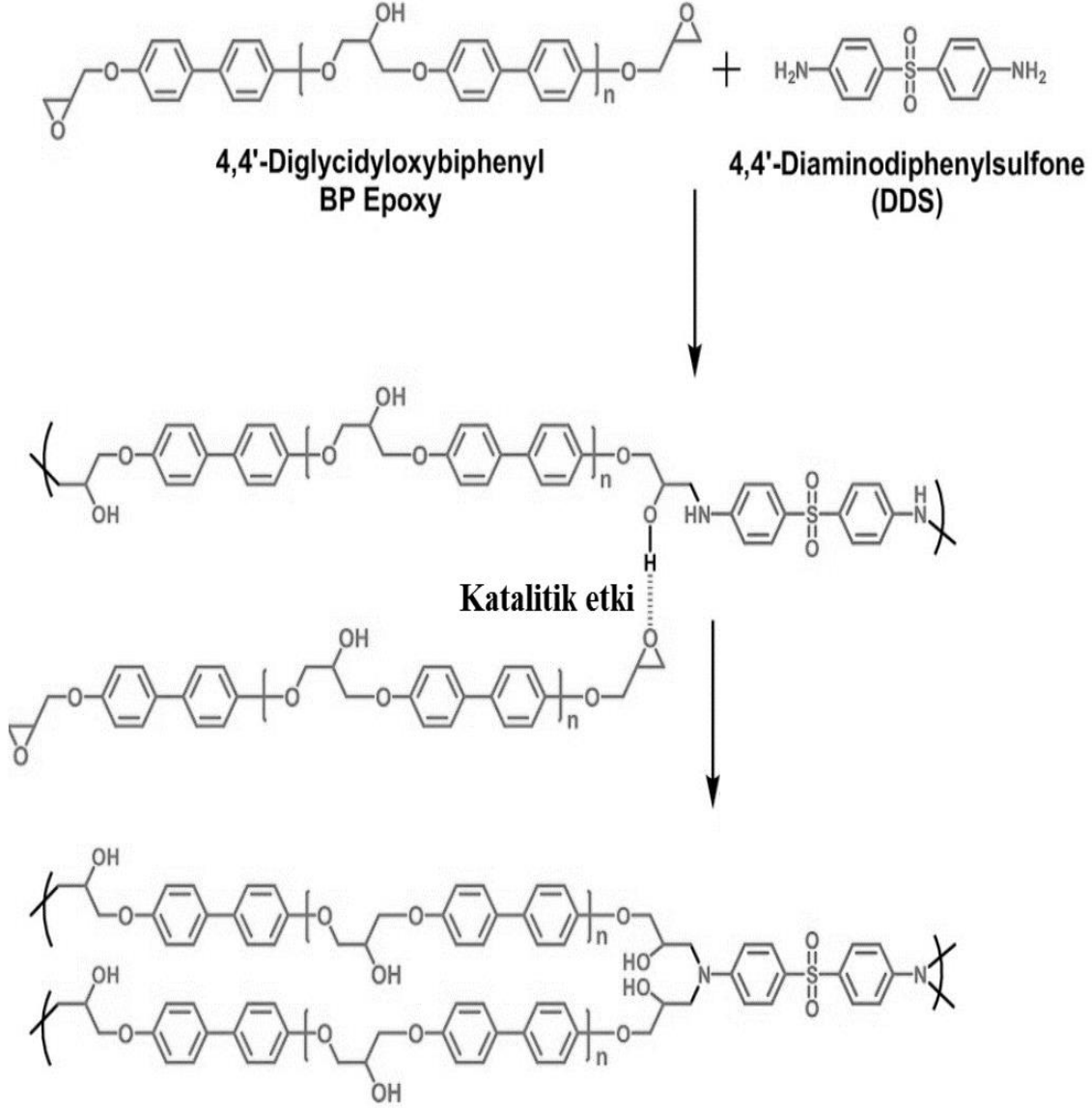


Şekil 7: Anhidrit ve alifatik epoksi reçinenin bir amin tuzu katalizörü ile kürlleme mekanizması (Lin vd. 2010)



Şekil 8: Kürlleme mekanizması (HDI/EP) (Zhang vd. 2019)

Yeo (2018) yapmış olduğu bir çalışmada, sıvı kristal epoksi reçineleri (LCER), yüksek termal iletkenliğe sahip umut verici bir polimerik malzeme olarak verilmektedir. Bunlar arasında, bir sıvı kristal (LC) fazının oluşumu için en basit moleküler yapıya sahip 4,4'-diglisidiloksibifenil (BP) epoksi, pratik uygulamalar için kullanılabilir (Şekil 9).



Şekil 9: 4,4'-diglisidiloksibifenil (BP) epoksi için kürlenme kinetiği (Yeo, 2018)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

DeneySEL olarak yapılan ön çalışmalarda, epoksi reçine ve sertleştirici belirlenen oranlarda hazırlanarak 3 ayrı deney seti oluşturulmuştur. 120 µ aplikatör kullanılarak demir plakalara boyalar çekilmiştir. Oda sıcaklığında kürlenme işlemine başlanmıştır. Plakalar öncelikli olarak etüvde kurutulmuştur.

Sonuçların değerlendirilebilmesi için, 0-10 arası puanlandırma yapılmıştır. Farklı deney setleri için sürenin ilerlemesine bağlı olarak bir değerlendirme yapılmıştır. Puan artışı kuruma süresinin kısa olması ile ilişkilendirilmiştir (Tablo 2). Sertleşme özelliğini test etmek amacıyla yapılan sertlik testi sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

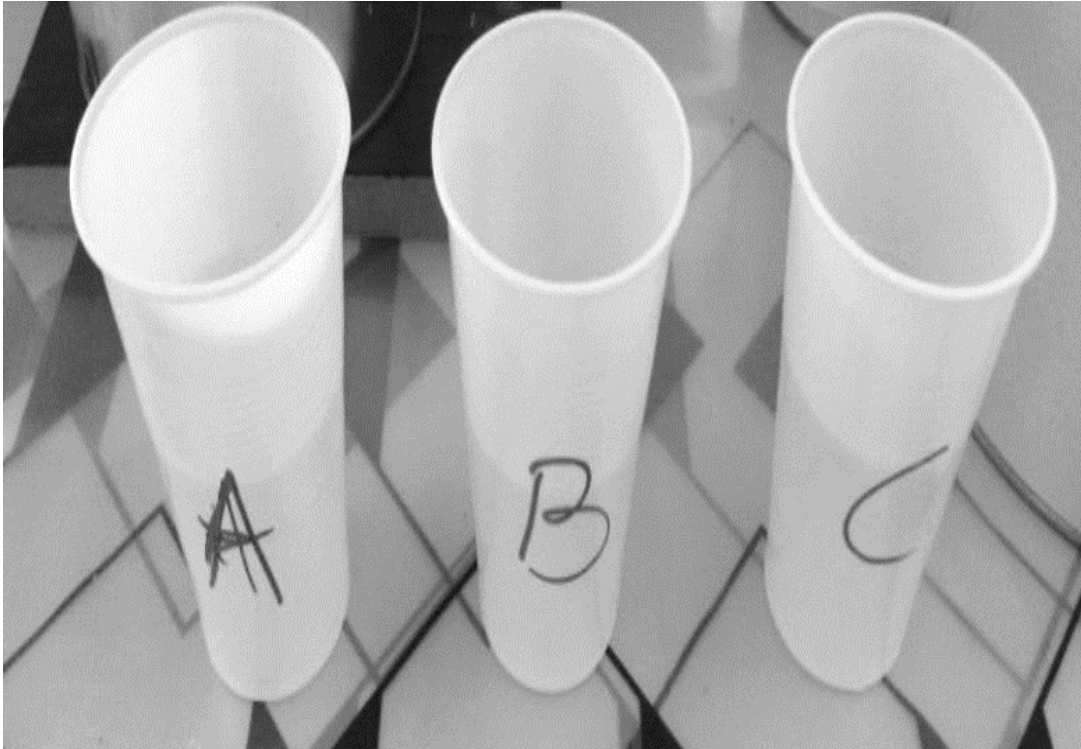
Tablo 2: Deney sonuçları

	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	16:45	17:00	17:20
A	0	5	6	8	10			
B	0	5	6	7	7	8	9	10
C	0	3	5	6	9	10		

Tablo 3: Sertlik testi sonuçları

	Sertlik (Shore)
A	78
B	62
C	63

Yapılan denemeler sonucunda ve literatür dikkate alınarak 80°C ve 30 dakika optimum proses koşulu olarak belirlenmiştir. Oda sıcaklığında 15 dk beklemenin ardından plakalar etüvden çıkarılmıştır. Hazırlanan karışımlar ve kaplanan plakalar Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.

**Şekil 10: Deneysel karışımlar**



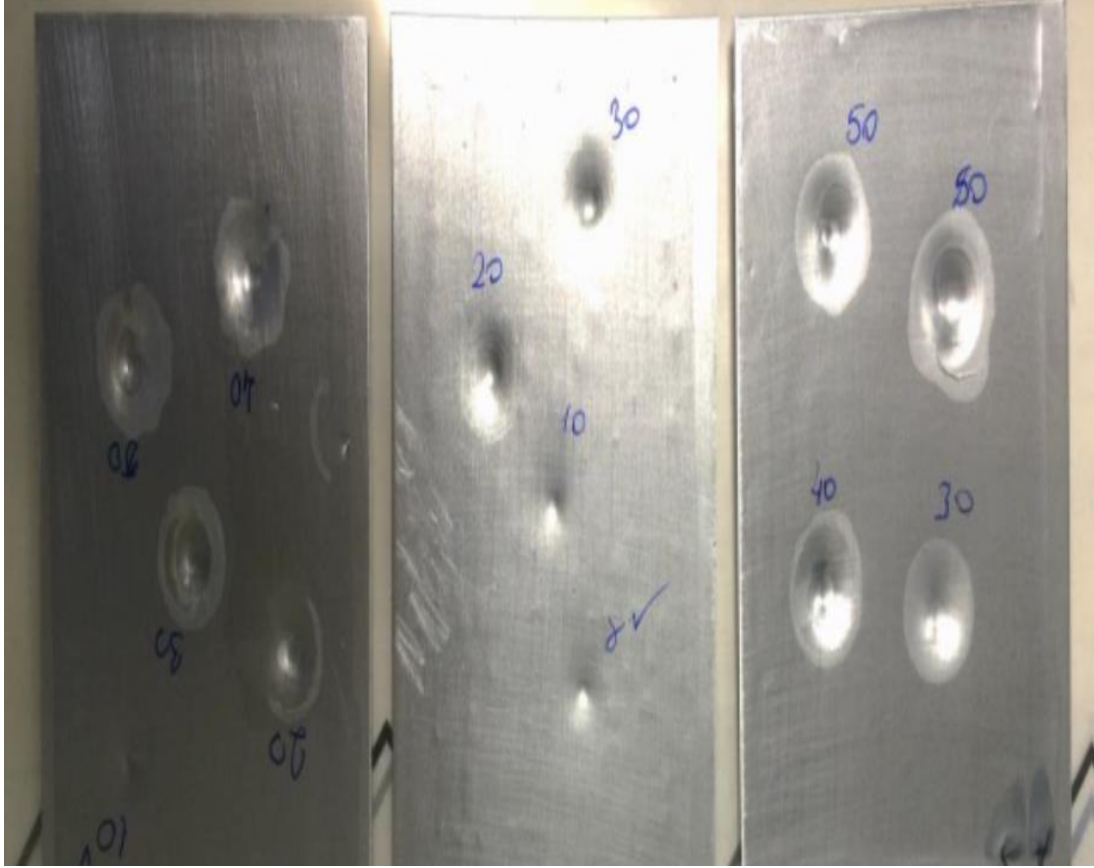
Şekil 11: Kaplanan metal plakalar

Çözücülere karşı kimyasal direnç testi için yaygın olarak metil etil keton kullanılmaktadır. Bu testte, 100 mikronluk film kalınlığı üzerine çözeltilerin temas ettirilmesi yoluyla işlem uygulanmıştır. Sonuç olarak, A için 40 kez, B için 37 kez, C için 32 kez uygulama söz konusu olmuştur. Sonuç olarak en dirençli olan deney sonucu, A olarak tespit edilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12: Kimyasal direnç testi sonuçları

Darbe direnci test sonuçlarına bakıldığında, epoksi reçine ile kaplanmış plakaların belli yükseklikten bırakılan ağırlık etkisi sonucunda, plaka direncinin yüksekliği test edilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13: Darbe testi sonuçları

5. SONUÇLAR

Epoksi reçineler günümüzde yaygın kullanılan yapıştırıcılardan yüksek performanslı kompozit malzemelere, endüstriyel ve koruyucu kaplamalara kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bisfenol A bazlı epoksi reçine sertleştirici kullanılarak kürlenmektedir. Farklı ağırlıklarda sertleştirici kullanarak, kürlenme tepkimesi ve epoksi sisteminin kinetiği literatürde geniş çaplı araştırılmıştır.

Bu çalışmada, farklı sertleştirici (poliamid, poliamin, poliüretan vb.) içeren epoksi reçinelerin etkileri ve özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, yapılan test sonuçları, farklı türlerde ve oranlardaki epoksi reçinelerinin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kürlenme mekanizmaları, kürlenmiş epoksi reçinelerinin özellikleri, kullanılacak bazı epoksi reçinelerin kimyasal yapıları, sertleştirici ve sertleştirme işlemleri detaylandırılmıştır.

Gerçekleştirilen testler sonucunda (sertlik vb.), oluşturulan A deney seti en iyi sonuçları vermiştir. A deney setinde elde edilen değerlerin, literatürle aynı oranda olduğu tespit edilmiştir. Özellikle darbe direnci değerleri 8-30 kg/cm² aralığında değişiklik göstermektedir.

Yapılan araştırmalar sonucunda, üretilen bazlı sertleştiricilerin oda sıcaklığında külendiği ve yaşlanma direncinin yüksek olduğu görülmüştür. Deneysel ön denemeler sonucunda, farklı reçine ve sertleştirme tipleri kullanımı yoluyla farklı alanlarda özellikle kaplama endüstrisi içinde kullanılabilirlik açısından olumlu sonuçlar elde edilebileceği saptanmıştır.

6. KAYNAKÇA

- Adamson, M.J. (1980). Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials, *Journal of Materials Science*, 15, 1736-1745.
- Akgür, M. (2003). Boya sektör profili-İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
- Altun, O. (2017). Boya pazarlama ve boya sektöründe çalışanların boya tercih sebepleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Sosyal Birimler Enstitüsü, İstanbul.
- Balık, Ö.Y. (2013). Boya endüstrisi atık suyunun koagülasyonu ile ön arıtımı, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bekircan, E. (2007). Su bazlı boyalarda süreç koşullarının dağılım kalitesine ve boya özelliklerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ceylan, L. (2001). Türkiye’de boya ve vernik endüstrisinin incelenmesi ve sektör analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Çelebisoy, U. (2007). Boya biliminin tarihçesi, Kimya Sanayii Kataloğu, İstanbul.
- Gupta, V.B., Drzal, L.T., Lee, C.Y.C. ve Rich, M.J. (1985). The temperature-dependence of some mechanical properties of a cured epoxy resin system, *Polymer Engineering and Science*, <https://doi.org/10.1002/pen.760251305>.
- Gündüz, G. (2005). Boya Bilgisi, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Hamerton, I., (1996). Recent developments in epoxy resins, Rapra technology Limited, United Kingdom.
- Jin, F.L., Li, X. ve Park, S.J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1-11.
- Kayran, B. (2013). Su bazlı-stiren akrilik esaslı-çinko borat katkılı boyaların alev geciktirme, duman bastırma ve antibakteriyel etkinlikleri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kavaklı, M., (2004), Boya sanayii arıtma çamurlarının nihai bertarafına yönelik öncelikli çözüm önerileri”, Cilt-1, Türkiye’de Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu III, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze- Kocaeli, 18-19 Kasım.
- Kimura, H., Matsumoto, A., Hasegawa, K., Ohtsuka, K. ve Fukuda, A. (1998). Epoxy resin cured by bisphenol a based benzoxazine, *Journal of Applied Polymer Science*, 68, 1903–1910.
- Kocabaş, E. (2009). Su bazlı boya üretimi atık sularının fiziko-kimyasal yöntemlerle arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lambourne, R. (1987). *Paints and surface coatings: theory and practice*, Ellis Horwood Limited, England.
- Lambourne, R. ve Strivens, T.A. (1999). *Paint and surface coatings: theory and practice*, Woodhead Publishing LTD.
- Lin, J.J., Chan, Y.N. ve Lan, Y.F. (2010). Hydrophobic modification of layered clays and compatibility for epoxy nanocomposites, *materials*, 3, 2588-2605, doi:10.3390/ma3042588.
- Liu, W., Wang, Z., Chen, Z., Li, J. ve Zhao, L. (2012). Synthesis and properties of two novel silicon-containing cycloaliphatic epoxy resins for electronic packaging application, *Polymer Advanced Technologies*, 23 367–374.
- Mercado, L.A., Galià, M. ve Reina, J.A. (2006). Silicon-containing flame retardant epoxy resins: Synthesis, characterization and properties, *Polymer Degradation and Stability*, 91(11), 2588-2594.

Ökenek, F. (2013). “Su bazlı ve stiren akrilik esaslı boyalarda alkali-toprak alkali borat katkılarının alev geciktirici özelliklerinin incelenmesi”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Rothenberg, G.B. (1978). Paint additives, Noyes Data Corporation, USA.

Vural, M. (1997). Kagir yapı dış yüzeylerinde boya uygulamalarına yönelik sorunların belirlenmesi ve çözüm önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yeo, H. (2018). Curing kinetics of liquid crystalline 4,4'-Diglycidylxybiphenyl epoxy cured with 4,4'-Diaminodiphenylsulfone, Polymer, 159(20), 6-11.

Zhang, X., Lu, X., Qiao, L., Jiang, L., Cao, T. ve Zhang, Y. (2019). Developing an epoxy resin with high toughness for grouting material via co-polymerization method, E-polymers, 19(1), <https://doi.org/10.1515/epoly-2019-0052>.

ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE ELEKTRİK-GAZ DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİNİN ENTEGRASYONU

Fazıl Kaytez*, İbrahim Eke

* Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Çankaya, Ankara

fkaytez@enerji.gov.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Enerji sektörü, elektrik şebekelerinde verimliliği sağlamak, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak, çevreye zararlı salınımları azaltmak ve maliyetler temelinde elde edilecek faydaları dengelemek amaçlarıyla enerji teknolojilerini etkin bir şekilde kullanma noktasında önemli değişimler geçirmektedir. Sahip olunan doğal kaynakları kullanma ve sera gazı emisyonlarını azaltma politikalarının bir parçası olarak, günümüzde birçok devlet fosil yakıtlı enerji sistemlerini, mümkün olduğunca hızlı bir biçimde yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerle değiştirmektedir. Fakat bu geçiş çeşitli teknik, ekonomik ve sosyal zorlukları da beraberinde getirmektedir (Leeuwen, 2018).

Elektrik şebekelerinde, yenilenebilir enerji kurulu güç artışları şebekeleri zorlayıcı bir takım sıkıntıları beraberinde getirmektedir. Özellikle, rüzgâr ve güneş gibi kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin doğa koşullarına bağlı olması, yani elektrik üretiminin kesikli olması şebekelerde özel bir takım problemler oluşturmaktadır. Buna durum ise, şebekelerde arz/talep dengesinin sürekli dengede tutulması için daha fazla esneklik sağlayan çözümlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Günümüzde birçok elektrik sisteminde esnekliğin ana sağlayıcısı olan termik santrallerin gelecekte yenilenebilir enerjinin hâkim olduğu şebekelerde daha az bulunması öngörüldüğünden, esneklik için farklı çözümler geliştirmek zorunlu hale gelecektir. Bu sıkıntıların veya zorlukların çözümü noktasında araştırmacılar yeni metodolojiler geliştirmeye/araştırmaya da teşvik edilmektedir.

Yenilenebilir enerji santrallerinin ağırlıkta olduğu şebekelerde esnekliği sağlayabilecek önemli bir seçenek Elektrik Gücünün Gaza dönüştürüldüğü, PtG olarak isimlendirilen (Power to Gas, veya P2G) teknolojilerdir. Esasen, elektrik gücü kullanılarak Sentetik Doğal Gaz (SDG) üretme fikri ilk olarak 1978 yılında Long isimli bir araştırmacı tarafından tanıtıldı (Long, 1978). Elektriği gaza dönüştürme (gaz şebekesini besleme) ve tepe yük talebini karşılamak için yeterli elektrik elde etme olasılığını açıklayan Long'un bu fikri, devam eden yıllarda Dünyanın belirli alanlarına kurulan gösteri amaçlı birkaç pilot proje ile hayata geçirildi. Farklı amaçlar için kullanılan Elektrik-Gaz dönüşüm teknolojileri bugün şebekelerde esnekliği sağlama amacıyla ortaya çıkan önemli çözümlerden bir tanesi olarak görülmektedir. Bu teknolojiye elektrik, temel olarak bir elektrolizör yardımıyla suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için kullanılmaktadır.

PtG teknolojileri, zamana, konuma ve son kullanıma göre elektrik şebekelerine üç farklı tipte esneklik sağlayabilmektedir. PtG'nin zaman esnekliği, elektriği kullanma ve hidrojen üretme zamanlamasının uyumunu sağlama yeteneğidir. Şayet bir PtG tesisi hidrojeni depolamak için tasarlanırsa, üretim sürecinin zamanlaması elektrik fiyatlarındaki dalgalanmalara göre uyarlanabilmekte ve depolama ile hidrojenin elektrik piyasasındaki müşterilerin istediği zamanlarda veya gaz fiyatlarının en karlı olduğu zaman dilimlerinde arz edilmesine olanak sağlayabilmektedir.

PtG'nin konum esnekliği, elektrik üretiminde elektrik taşımacılığı maliyetlerini düşürerek, alternatif konumlara olanak verme becerisidir. Örneğin; açık deniz (off-shore) rüzgâr santralleri tarafından üretilen elektriğin, mevcut bir elektrik şebekesi üzerinden taşınması yerine, rüzgâr santraline yakın bir noktada hidrojene dönüştürülebilmektedir. Bu elde edilen hidrojen ise gemi yâda

gaz nakil hatları kullanılarak doğrudan tüketicilere taşınabilmektedir. Hidrojenin doğalgazın bir bileşeni olan metan gazına daha fazla dönüştürülmesi ile hâlihazırda mevcut olan doğal gaz şebekesinin kullanılması mümkün olabilmektedir. Yüksek gerilim hatlarının, yeni yatırımlarının çok maliyetli olması nedeniyle, elektriğin özellikle tüketim merkezlerinden uzak yerlerde üretilmesi ve mesafelerin büyük olması durumlarında, PtG teknolojisi yenilenebilir enerjinin ulaşım maliyetlerinde önemli düşümlere de yardımcı olabilmektedir.

PtG'nin son kullanım esnekliği ise, kullanıcıların kendi enerji sistemlerini değiştirmelerine gerek kalmadan elektrik tüketicileri dışındaki kullanıcılara yenilenebilir enerji sağlamak için kullanılabilmesidir. Bu konuda sanayi ve ulaştırma sektörü örnek verilebilir. Bunun için üretilen hidrojen doğrudan kullanılabilir ya da metan, metanol, amonyak gibi başka bir kimyasal maddeye de dönüştürülebilmektedir.

PtG teknolojisini, günümüzde en etkin kullanan ülkenin Almanya olduğu görülmektedir. Özellikle, Almanya'nın kuzey bölgelerindeki rüzgâr santrallerinin varlığı ile birlikte, güneyde büyük sanayi kuruluşları ile oluşan büyük elektriksel yük varlığı, kuzeyden güneye uygun bir enerji taşıma aracı oluşturmada PtG teknolojisi için uygun şartlar oluşturmuştur. Günümüzde neredeyse ülkelerin büyük bir çoğunluğunda yeni enerji hatlarının yapım/tesis maliyetleri ve güzergâhların belirlenmesinde yaşanan zorluklar (genellikle halk tarafından kabul edilmemesi gibi) karar vericilere yeni yöntemler uygulama zorunluluğu getirmektedir. Örneğin Avrupa'daki tüm sanayileşmiş ülkelere yayılmış bir gaz şebekesi olduğu düşünüldüğünde, enerjiyi gaz biçiminde depo etmek ve YEK potansiyelinden etkin yararlanma noktasında PtG teknolojisi kullanılacak bir enerji vektörünü (taşıyıcısını) temsil edebilmektedir. PtG seçeneği, RES tabanlı tesisler tarafından üretilen elektriğin uzun süreli depolanması için uygun bir çözümü de temsil ederken, elektrik şebekelerinin bölgesel ısıtma gibi diğer enerji sistemlerine bağlanmasına da olanak sağlayarak, şebeke esnekliğini artırmada önemli bir rol üstlenebilmektedir(Schiebahn, 2013; BMWi, 2010).

Gaz ve elektrik, hem PtG hem de Gaz-Güç dönüşümünün gerçekleştiği tesisler (Kombine Çevrim Gaz Türbinleri (KÇGT) veya Açık Çevrimli Gaz Türbini (AÇGT) gibi) yardımıyla birbirine bağlanır. Bir örnek olarak; Şekil 1'de potansiyel yollar ve bağlantılar gösterilmektedir. Şekildeki; mavi çizgiler müşteriye ısıtma ve mobilite¹ gibi amaçlarla sunulan veya elektrik, ısı ya da mekanik enerjiye dönüştürülebilen gaz vektörünü (taşıyıcısını) temsil eder. Kırmızı çizgiler genellikle doğrudan müşterilere sunulan elektrik vektörünü temsil eder ancak gaza (SDG veya H₂) veya ısıya da dönüştürülebilir. Yeşil çizgiler, hem elektrikten hem de gazdan üretilebilen ve bir bölgesel ısıtma sistemi aracılığıyla dağıtılabilen ısı vektörünü temsil eder. Son olarak; gri çizgiler ise, mobilite sektöründe kullanılabilen, mekanik enerjiye ve ısıya dönüştürülebilen veya SDG üretimi için bir eleman olarak kullanılabilen muhtemel H₂ dağılımını temsil eder. H₂ ve SDG arasındaki bağlantı, aynı tesise bir elektroliz aletinin dâhil edilmesine gerek kalmadan doğrudan tanklarda depolanan H₂'den (örneğin, küçük enerji santralleri için SNG olanlarına) SDG üretiminin yapılabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 1'de olası bağlantılar (örneğin gazdan H₂ üretimi veya SDG'den H₂ ya da CO üretimi gibi uygulamalar), karışıklık olmaması için özellikle gösterilmemiştir. PtG aslında, günümüzün çoklu enerji üretimi çerçevesinde artan bir entegrasyonda, önemli bir şebeke bileşenini temsil ediyor(Mancarella, 2009; Jenkins, 2010).

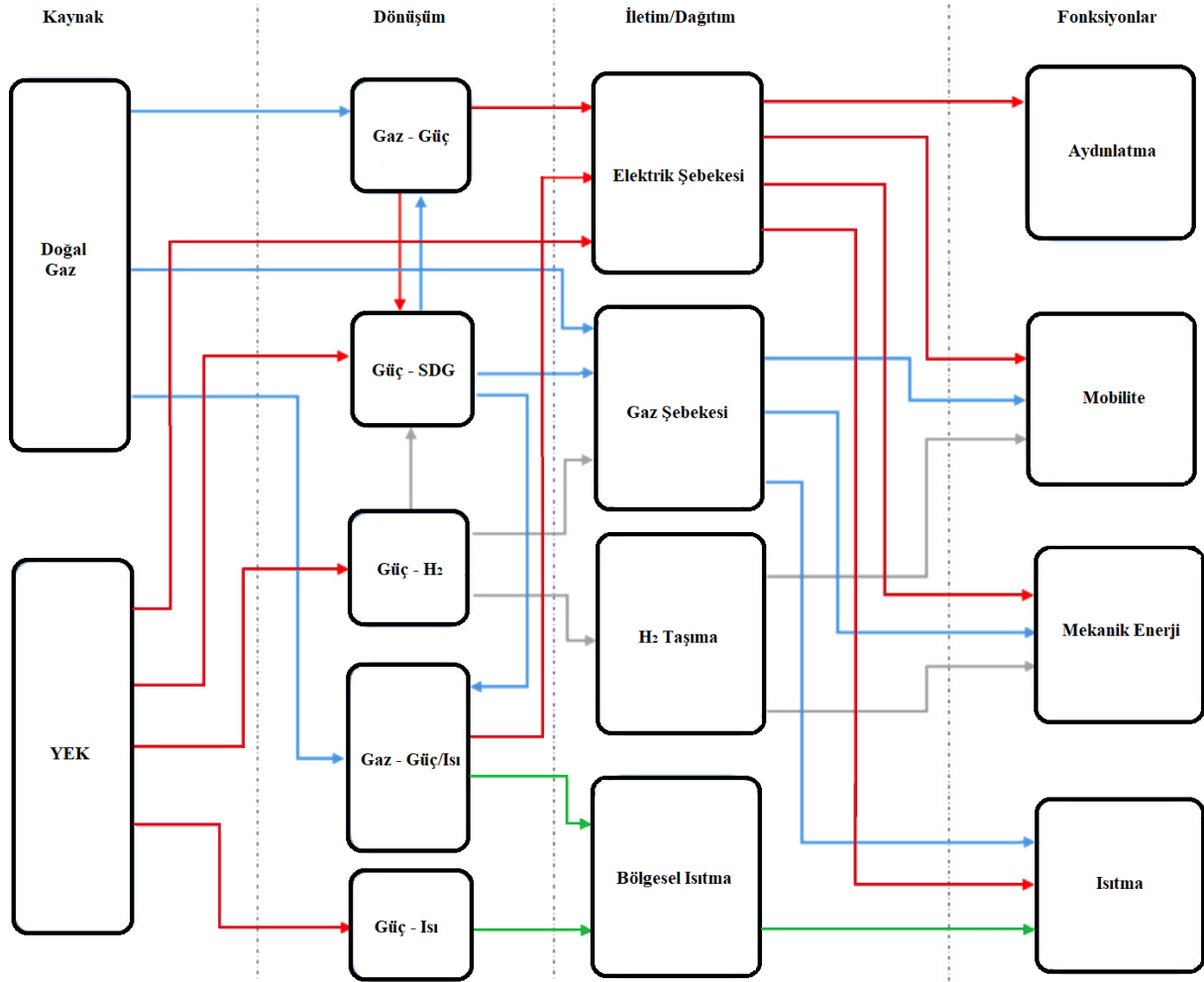
Bu çalışma, esasen PtG'nin elektriksel yönlerinin analizine odaklanmaktadır. Dolayısıyla, konunun bütün ve eksiksiz olması amacıyla, hem teknolojinin ana esasları hem de elektrik sisteminin yapısının kısa bir sunumu da yer almaktadır.

Üretim: Bu sektör, şebeke yükü ve sistem kayıplarının toplamını karşılamak için gerekli olan enerjiyi üreten tüm santralleri içermektedir. Santraller temel olarak iki kategoriye ayrılabilir: Bunlar, istenildiğinde kullanılabilen (dispatchable) santraller ile istenildiğinde kullanılmayan (non-

¹ Mobilite: Enerji sektöründe, elektromobilite veya e-mobilite, elektrikli arabaların yanı sıra e-bisikletler, elektrikli motosikletler, e-otobüsler ve e-kamyon gibi bataryalı ve hareketli enerji taşıyıcılarını ifade etmektedir.

dispatchable) üretim santralleridir. İstenildiğinde kullanılabilen kavramı tüm emre amade generatörleri (hidroelektrik, fosil yakıtlı termik, nükleer birincil santraller gibi...), istenildiğinde kullanılmayan kavramı ise yenilenebilir enerji kaynaklı santralleri ifade etmektedir. Şebekelerde, kontrol edilemez birimlerin geniş alanlara yayılımı ile sayıca ve güç olarak zamanla artan varlığı tüm sistemin işleyişini daha karmaşık hale getirmektedir. Bu sistemlerin, kontrol edilebilme eksikliği, koordine olmayan operasyon planlarına sahip farklı üretim kaynaklarının enerji arzı, çevresel değişkenlerden dolayı bu birimler tarafından sağlanan güç çıkışlarındaki büyük belirsizlikler ve şebeke ile dönüştürücü tabanlı ara yüze sahip birimlerin düşük ataletinden (veya düşük etkileşimi) dolayı şebeke karışıklıkları ortaya çıkmaktadır.

İletim: Elektrik iletim sistemleri, yüksek gerilim (YG) hatlarından oluşmakta ve uzun mesafelere elektrik aktarımını garanti etmektedir. Tüm elektrik sisteminin omurgasını temsil eden iletim şebekeleri, özellikle arıza durumunda yüksek güvenlik seviyesine izin vermede arızalı bileşeni dışlama ve sistemlerdeki güç akışlarını yeniden dağıtma imkânı sağlamaktadır. İletim ağı, tek tek bileşenlerde veya arızalı noktalarda hizmet kesintileri olmadan, bir enterkonnekte yapı üzerinden çalıştırılmaktadır(Mazza, 2018).



Şekil 1: Farklı vektörleri içeren (yani, elektrik, doğal gaz, H₂ ve ısı) enerji yolları.

Dağıtım Sistemi: Bir elektrik dağıtım sistemi, hem orta gerilim (OG) hem de alçak gerilim (AG) hatlarını içerir ve ağı iletim sistemi ile yükler arasında kalan kısmını temsil eder. OG/AG dağıtım sistemi normalde zayıf bir örgülü yapıya sahiptir ve koruma sistemlerinin çalışmasını kolaylaştırmak için radyal konfigürasyonlarla çalıştırılmaktadır.

Müşteri tarafı: Elektrik sisteminin tüm yüklerini temsil etmektedir. Gerilim seviyesi, nominal güç, müşteri tipi (örneğin, mesken, endüstriyel, ticari), zaman içerisindeki aktif güç ve reaktif güç değişimini gösteren yük örüntüsünün şekli, sözleşme bilgisi gibi farklı yük tipleri arasında bir ayırım yapılabilir. Genel olarak, yükler YG, OG ve AG seviyelerinde bağlanabilmekte, müşteriler elektrik tedarikini ve hizmetlerini satın almak için satıcıyla direkt olarak etkileşime girebilmektedir.

Geçmişte birçok ülkenin elektrik piyasası, sahip olunan ve yönetilen tek bir şirket vasıtasıyla elektriğin tüm değer zincirlerini dikey yönetim modeliyle kapsamaktaydı. Ancak, geçen yüzyılın sonundan bu yana pek çok elektrik sektörünün ayrıştırılarak, eski dikey yönetim anlayışı tamamen terk edilmiştir. Yaşanılan bu dönüşümle, değer zinciri boyunca elektrik piyasasında birden fazla oyuncunun da ortaya çıktığı görülmektedir(Perez-Arriaga, 2009). Dikey yönetim modelindeki hizmet sağlayıcılar yeni piyasa yapısına adapte olmak için; ayrılma stratejini belirlemiş ya da birbirleri veya elektrik pazarındaki diğer yeni şirketlerle rekabet etmek zorunda kalmışlardır. Bununla birlikte, iletim sistemi her ülkede bir tek varlık olarak kalmıştır ve ağ yapısı ile ulus ötesi düzeyde birbirine bağlanması nedeniyle iletim sistemi operatörü tarafından yönetilmiştir. Ayrıca, iletim sisteminin işletim prosedürlerini koordine etmek için belirli uluslararası örgütler oluşturulmuştur. Gelişmiş elektrik piyasalarında, elektrik dağıtım sistemi bölgesel alanlara bölünerek, farklı operatörlerin yönetimine bırakılmıştır. Ayrıca, yeni piyasa kurgusunda elektrik enerjisi bir meta haline getirilerek, daha fazla perakendecinin açık bir perakende pazarında rekabet etmesine olanak sağlanmıştır. Piyasaların varlığı, elektrik fiyatını düşürmek amacıyla oyuncular arasındaki rekabeti hedeflemektedir. Mevcut durumda, çeşitli ülkelerde elektrik piyasalarının farklı uygulamaları bulunmakla birlikte, en gelişmiş anlamda, elektriğin üretimi ile son kullanıcıya fiziksel olarak teslim edilmesi arasındaki zaman dilimine bağlı olarak, gün öncesi piyasasında veya gün içi piyasalarında elektrik ticareti yapılabilmektedir (Shahidehpour, 2002).

Bu çerçevede, akıllı ölçümün varlığı ve bilgi toplanması önem kazanmaktadır. Teknik açıdan bakıldığında; hizmet sağlayıcıların daha fazla bilgiye sahip olması, sistemin sürdürülebilir olarak işletilmesini garanti etmekte ve böylece kaynakların ve altyapıların doğru konuşlandırılması, daha iyi değerlendirilmesi ve sistemin güvenliğini kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır. Elektrik piyasalarının işletilmesinde nihai tüketicilere sağlanan elektriğin yeterli kalitede olması ve tüketicilerin elektrik kullanımları hakkında daha ayrıntılı/veya özellikli bilgilerin bulunması oldukça önem arz etmektedir (Römer, 2012; Joung, 2013).

Birçok ülkenin elektrik piyasasında elektrik şebekelerindeki hızlı dönüşümün halen devam ettiği görülmektedir. Esasen, gelecekteki elektrik sistemlerinin, özellikle uzak bölgeleri birbirine bağlayacak uzun mesafeli Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) hatlarının inşa edilmesi ile büyük bir iletim sistemine sahip süper şebeke² gibi paradigmalara geçiş öngörülebilir. Bir başka olasılık, mevcut altyapının sadece yedek olarak kullanılacağı özerk bazı sahalar hizmet etmek için çeşitli mikro şebekelerden oluşan bir elektrik sistemine sahip olmaktır. PtG teknolojisi, ölçeklenebilirliğinin bir sonucu olarak, her iki senaryoda da kullanılabilir(Schettler, 2012; Lasseter, 2002).

Yukarıda ifade edilenler ışığında; bu çalışma PtG teknolojisinin şebekelerde konuşlandırılmasında rol oynayan elektriksel yönlerden bahsetmekte ve literatürde yer alan uygulamaların genel bir özetini sunmaktadır. Keza, PtG teknolojisinin elektrik sistemlerinde kullanımı için farklı alternatifler gösterilmektedir. Amaç, PtG'nin elektrik sistemleri üzerindeki fiziksel bağlantısı ve potansiyel etkisi ile ilgili farklı yönleri birleştiren bir strateji belirlemektir ki, bu durum PtG ile elektrik şebekesi arasındaki bağlantıların daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak için farklı alanlarda çalışan operatörlerin yetkinliklerinin birleştirilmesine de yardımcı olacaktır.

Bu çalışmanın sonraki bölümleri aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Bölüm 2'de PtG teknolojilerinin genel bir özetini sunulmaktadır. Bölüm 3'de literatürde gösterilen uygulamalar gözden geçirilmekte ve PtG'nin bir elektrik sistemi değer zincirini oluşturan tipik sektörler (üretim, iletim,

² Süper şebeke: Uzak mesafelere yüksek hacimli elektrik ticareti yapmayı mümkün kılan geniş alanlı bir iletim ağı.

dağıtım ve nihai kullanım noktasında) dâhil edilmesi için yeni olanaklar tespit edilmektedir. Dördüncü ve son bölümde ise sonuç görüşlere yer verilmektedir.

2. İLGİLİ TEKNOLOJİLERE GENEL BİR BAKIŞ

Bir PtG ünitesinin normal olarak çalışması için, bağlı olduğu elektrik sisteminden alınan belirli bir güce ihtiyacı vardır. PtG ünitesi, elektrolizörün kontrol edilebilirliği sayesinde bir sistemin çalışmasına aktif olarak katılmak için gücü minimuma indirebilir.

Bu bölümde, bir elektrik şebekesinin çalışması üzerinde doğrudan etkisi olan PtG tesisleri hakkında ön bilgiler sunulmakta ve bir PtG tesisinin operasyonel süreçleri içerisinde yer alan (Elektroliz cihazı, karbondioksit (CO₂) üretimi/hidrojen (H₂) sıkıştırma ve depolama) bölümler kısaca açıklanmaktadır.

2.1. PtG Santrali

Karakteristik bir PtG santrali en az dört bileşenden oluşmaktadır. Bunlar(Belderbos, 2015);

- H₂'nin üretilmesine izin veren bir elektroliz cihazı,
- Bir metanasyon işlemi cihazı,
- Metanasyon aşaması için gerekli olan bir CO₂ kaynağı,
- H₂, CO₂ ve metan (CH₄)'nın güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamak için depolama tesisi

Bu tesislerde, temel olarak girdiler “elektrik, su ve CO₂” iken, sistem çıkışları “sentetik doğalgaz, O₂ ve ısı” olarak listelenebilir. Bu tesislerde, özellikle suyu pompalamak ve H₂'ni sıkıştırmak için elektrik enerjinin dışarıdan transferi elzemdir.

Elektrolizör, hidrojenin sudan (H₂O) ayrıştırılması yoluyla üretilmesine izin verir. Bu kimyasal bakış açısına göre endotermik bir reaksiyondur. Reaksiyon için enerji tüketimi, kullanılan teknolojiye bağlıdır ve işlemin sıcaklığına ve basıncına göre değişmektedir(Ursúa, 2012).

İdeal bir elektrolizörde, hidrojen üretimi Faraday yasasına göre cihazda akan akımla orantılıdır. Yüksek hücre yoğunluğu için yüksek akım değerlerine ulaşılabilmesi gerekmektedir ve dolayısıyla yüksek bir akım yoğunluğu tercih edilmelidir.

Bir PtG tesisinde için üç ana teknoloji kullanılabilir:

- Alkalın elektrolizörleri;
- Proton Değişirme Membranı veya Polimer Elektrolit Membranı (PEM) elektrolizörleri;
- Katı Oksit Elektrolizi (SOEC).

Bu üç ana teknolojiye Katı Oksit Elektrolizörlerinin henüz yeterli teknolojik olgunluğa erişmediğinden, genellikle PtG tesislerinde Alkalın ve PEM elektrolizörler kullanılmaktadır.

PtG santralleri için önemli bir parametre, üretilen hidrojenin enerji içeriği ile onu üretmek için kullanılan enerji arasındaki oran olarak tanımlanan verimliliklerdir. Netlik ve verimi hesaplamak için kullanılan ısıtma değeriyle ilgili herhangi bir karışıklığı önlemek için, üreticiler genellikle spesifik enerji tüketimini (kWh/Nm³ olarak ifade edilir) belirtirler.

2.2. Karbondioksit (CO₂) Üretimi

Sentetik doğalgaz üretiminin olumlu yönlerinden biri CO₂ kullanma olasılığı ve dolayısıyla atmosfere salınımını geciktirmektir(Vanderwalle, 2015). Bununla birlikte, CO₂'nin saflığı üretilen

sentetik doğlagazın kalitesini etkilemektedir ve mevcut bir gaz şebekesine entegre edilebilmesi için mutlak parametrelerin doğrulanması gerekmektedir. (örn. Wobbe Endeksinin minimum değeri gibi) (Kavalov, 2009). Belli başlı CO₂ kaynakları şunlardır: (Schiebahn, 2013; Reiter, 2015):

- Karbon tutma kaynaklı CO₂;
- Fermantasyon, gazlaştırma ve yanma yoluyla elde edilen biokütleden elde edilen CO₂;
- Yan ürün olarak elde edilen endüstriyel proseslerden elde edilen CO₂;
- Havadan gelen CO₂.

2.3. Hidrojen Sıkıştırma ve Depolama

Bu çalışmanın odaklanma noktası PtG teknolojilerinin elektriksel yönleri olması nedeniyle, kimyasal süreçlere ilişkin bilgilere ön bilgi mahiyetinde değinilmektedir. H₂ sıkıştırma ve saklama ile ilgili ayrıntılı bilgilere Grond (2013)'un çalışmasında yer verilmektedir. Sıkıştırma tankında, atmosfer basıncından 200 bar basınca geçmenin enerji gideri 3,6 kWh/kgH₂ iken, 1 barlık bir emme basıncı ve deşarj basıncında enerji gideri 1,3 kWh/Nm³tür. H₂'nin gaz şebekesine enjeksiyonu için 8 barlık kompresörün deşarj basıncı olduğu varsayılmaktadır.

3. ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE PTG TEKNOLOJİSİ

Bu çalışmada, Elektrik gücü ile gaz dönüşüm teknolojisi ile ilgili mevcut literatür incelenmiş ve elektrik sistemi üzerinde doğrudan etkisi olan bazı çözümlerin ve farklı sektörlerdeki uygulamalar göz önünde bulundurularak elektrik değer zinciri olarak adlandırdığımız üretim, iletim, dağıtım ve son kullanım noktaları yönünden ayrıntılı irdelenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma, Elektrik-Gaz dönüşüm tesislerini ve elektrik sisteminin farklı sektörlerde işleyişini daha kapsamlı bir şekilde analizini yapabilmek için gerekli olan kavramsal yönleri ortaya koymaktadır. Her bir sektör için yeni Gaz Gücü uygulamaları ile ilgili bazı farklı bakış açıları da sunulmakta ve elektrik sistemlerinin gelecekteki teknik ve ekonomik evrimi içerisinde ilgili bu teknolojilerin oynayacağı roller ve ümit verici konular tartışılmaktadır.

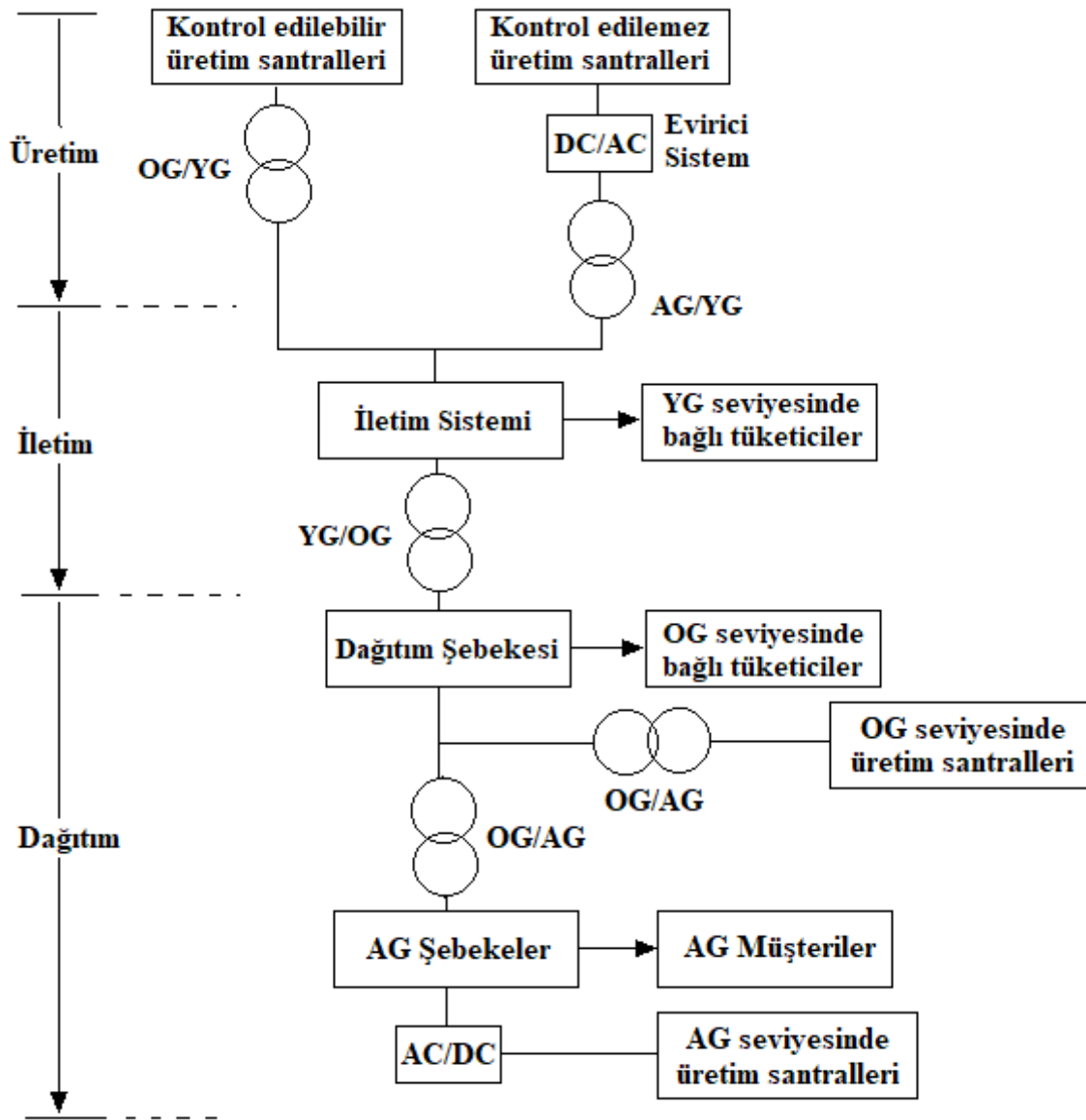
Elektriğin kullanıma arz edilmesi sürecinde temel dört değer zinciri bulunmaktadır. Bunlar; Üretim, İletim, Dağıtım ve Nihai tüketici tarafı olarak ifade edilmektedir (Şekil 2).

3.1. Elektrik Üretim

Elektrik üretiminde ilk ayırım; daha öncede ifade edildiği gibi kontrol edilebilir ve kontrol edilemez birimler arasındadır. Her iki durumda da ortak amaç, tesislerin teknik ve ekonomik açıdan daha verimli kullanılmasına izin vermektir. Kontrol edilebilir birimler için PtG kullanımı aslında şunları sağlayabilir:

Elektrikten gaza veya bunun tersine enerji kaydırma olasılıklarının artması nedeniyle şebekeye daha fazla esneklik sağlanabilmektedir. Bu durum, hem sisteme yedek kapasite sağlamak hem de kontrol amacıyla elektrik şebekesine servis edilen veya elektrik şebekesinden çekilen elektrik gücünde değişiklik yapılması gerektiğinde sistem için oldukça yarar sağlar.

Elektrik piyasalarındaki fiyat değişmelerine göre hizmet sunumuyla ilişkili arbitraj (ara kazanç) fırsatı verir. Ve çevresel olarak CO₂ emisyonu azaltarak, bazı gelişmiş elektrik piyasalarında bulunan sera gazı emisyonu ticaretine dayalı enerji ile ilgili pazarlara katılma imkânı da verebilmektedir. Elektrik üretim tarafı için PtG teknolojilerinin kullanım alanlarını gösteren bir sınıflandırma Şekil 3'de gösterilmektedir.



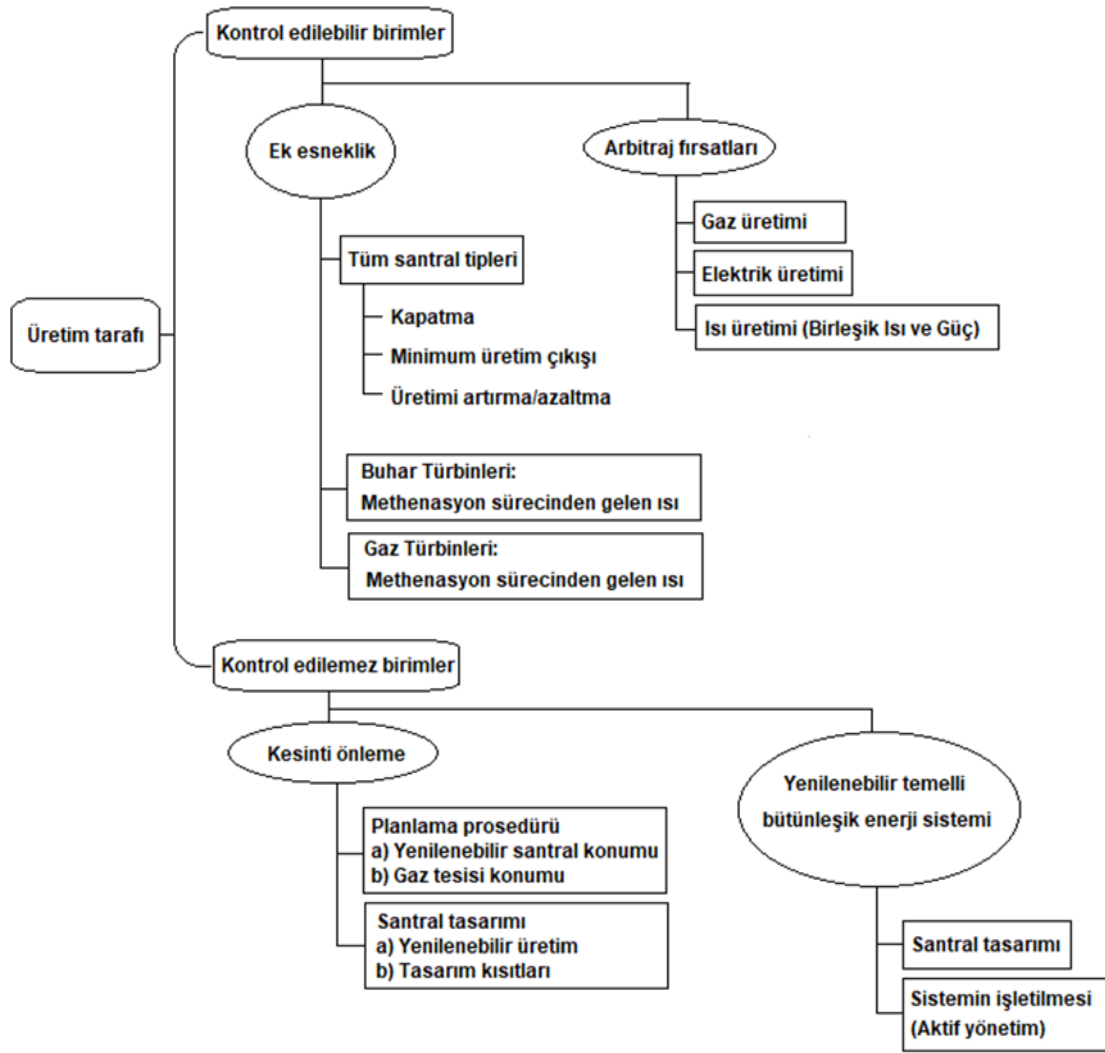
Şekil 2: Elektrik piyasası değer zinciri

3.1.1. Kontrol Edilebilir Birimler

Kontrol edilebilir birimlerle birlikte PtG'nin kullanımı, literatürde birçok farklı uygulama araştırılarak işlenmiştir.

Scamman (2016)'ın çalışmasında, nükleer santrallerin üretim profilinin mümkün olduğunca sabit tutulabilmesi için PtG teknolojisinin mevcut nükleer enerji santrallerine entegre edilmesi olasılığı değerlendirilmektedir.

PtG ile yaklaşık 300 MW gücünde bütünleşik biokütle yakıtlı Birleşik ısı- güç tesisi rapor edilmiştir(Tsupari, 2015). Yeni bir PtG-biokütle oksigaz hibrit sistemi Bailera (2016)'ın çalışmasında sunulmaktadır. Potansiyel yeni bir uygulama ise, santralin fiili üretimi ile planlanan üretim arasındaki uyumsuzluğu azaltmak için bir Birleşik Isı-Güç tesisi ile birlikte PtG tesislerinin birlikte kullanılmasıdır.

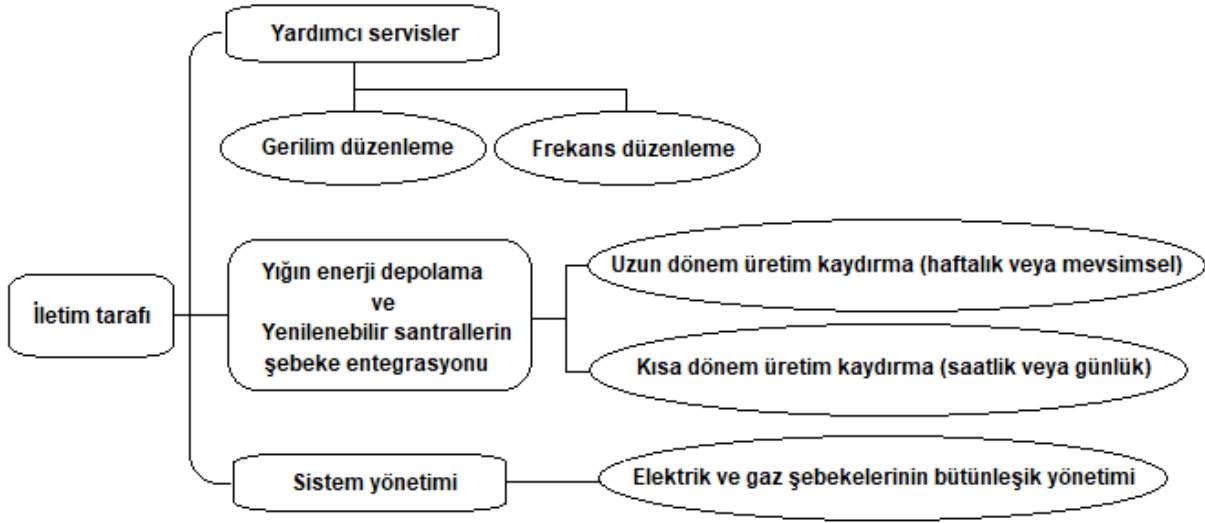


Şekil 3: Üretim tarafında PtG teknolojisi uygulamaları

3.1.2. Kontrol Edilemez Birimler

Hidroelektrik santraller hariç, yenilenebilir enerji tabanlı santrallerin çoğu üretim sistem operatörü tarafından doğrudan kontrol edilememektedir (Mason, 2010; Bélanger, 2002). Son yıllarda ortaya çıkan hedeflerden biri, farklı depolama teknolojilerinin (Gallo, 2016; Härtel, 2016) kullanılması ile yenilenebilir enerji üretim kaynaklarındaki kesikli üretimin azaltılmasıdır. Guandalini (2016) rüzgâr türbinlerinin kontrol edilebilirliğini artırmak için enerji ve ekonomik yönlerden bir değerlendirmelerde bulunmuştur. Burada, PtG tesisi metan yerine hidrojen üretme amacına sahiptir ve tüm tesis bir gaz türbinine bağlanmıştır.

Analiz altındaki sistem bir ada olduğunda, yenilenebilir enerji santrallerindeki kısıtlı üretim dezavantajının ortadan kaldırılması daha da önem kazanmaktadır. İrlanda vakasının bir analizi Ahern (2015)'in çalışmasında sunulmuştur. Sonuçlar, bir PtG tesisinin kurulmasının adadaki toplam enerji kesintisini azaltabileceğini göstermektedir. İspanya çerçevesinde metan üretmek için PtG kullanımı ile ilgili bir çalışma Gutierrez (2016)'in çalışmasında yer almaktadır. Bu çalışmada; proses bölümünün tasarımı, elektrik maliyetleri ve gaz alımı dikkate alınarak ekonomik bir değerlendirmeyle birlikte önerilmektedir.



Şekil 4: İletim tarafında PtG teknolojisi uygulamaları

3.2. Elektrik İletimi

Şekil 4’de görüldüğü gibi, PtG uygulamalarının iletim tarafında kullanımı; yan hizmetler, depolama/yenilenebilir enerji santrallerinin şebeke entegrasyonu ve sistem yönetimi olarak üç grup altında sınıflandırılabilir.

3.2.1. Yardımcı (Yan) Hizmetler

PtG tesislerinin elektriksel tepkisi esasen elektrolizörün tepkisi ile sağlanmaktadır. Bu nedenle, yan hizmetler sağlama olasılığı direkt olarak elektrolizörün performansına bağlıdır. Bu nedenle, bu durumda, sentetik doğal gaz üretiminin bir etkisi bulunmamaktadır.

Literatürdeki çalışmaların birkaçı yan hizmetleri PtG'nin (metan üretimi için) olası uygulamalarından biri olarak görmektedir.

Lund(2015)'in çalışmasında, şebeke yan hizmetleri³ sürelerine göre listelenmektedir Burada; çok kısa (milisaniyeden 5 dakika seviyesine kadar), kısa (5 dakikadan 1 saat seviyesine kadar), orta (1 saat ila 3 gün arası) ve uzun (mevsimsel) olmak üzere dört farklı seviye bulunmaktadır. Özellikle, şebekelerde kısa süreli güç ihtiyaçlarının (Sistemin yeniden ayağa kaldırılması/Black start, Yedek güç/spinning reserve gibi durumlar...) karşılanmasında Hidrojen üretiminin karakteristikleri, geleneksel gücün yerine kullanılabilir.

Hidrojen üretiminin uygun olduğu diğer uygulamalar ara hizmetler olarak sınıflandırılır:

- Yük takibi (Yük eşleştirme için sürekli bir hizmet sağlama)
- Yük dengeleme (Bir yükün mümkün olduğunca eşit olmasını sağlama)
- Birim taahhüdü (Eğer tahmin edilen yenilenebilir üretim ile gerçek üretim arasında tamamen farklı atmosferik koşullardan kaynaklı bir uyumsuzluk var ise; bu uyumsuzluğu karşılamak için istenmektedir (Tuohy, 2012).

³ Yan Hizmetler: Üretim santralleri için, üretim faaliyetlerinin dışında şebeke ihtiyaçlarına göre sağlanan hizmetleri ifade ederken, şebeke iletim operatörü için iletim faaliyetleri dışında kalan hizmetleri ifade etmektedir.

3.2.2. Yiğın Depolama ve YEK Entegrasyonu

Literatürde yürütülen birçok çalışma sistemin esnekliğini arttırmak için enerji depolamak ve yenilenebilir enerji santrallerini şebekeye entegre etmek için PtG kullanılmasını önermektedir (Kondziella, 2016).

Bazı çalışmalarda, mevsimsel depolama için en uygun çözümler olarak PtG ve Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PHES) olduğu belirtilmektedir(Lund, 2015). Bazı basitleştirmeler ve gelecekteki bazı teknolojiler çalışmada dikkate alınmış olsa da, Almanya elektrik sistemine RES'nin daha iyi entegrasyonu için PtG'nin gücü araştırılmaktadır. Keza, kimi çalışmalarda (Bogdanov, 2016) PtG teknolojisinin, Kuzey Doğu Asya'da % 100 yenilenebilir enerji tabanlı bir sisteme ulaşmanın anahtar faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Bir elektrik sisteminin toplam maliyetini azaltmak için büyük ölçekli depolama tesisleri, (De Boer, 2014)'de incelenmiştir. PtG teknolojisi, PHES ve Basınçlı Hava Depolama (CAES) teknolojilerinden sonra en uygun üçüncü seçenek olduğu görülmektedir.

PtG tesislerinin kurulumu, üretim santrallerinin kontrol edilebilirliğini değiştirebilmektedir. Heinisch(2015) tarafından Danimarka iletim sisteminde basitleştirilmiş bir prototipi kurulan PtG tesislerinin (farklı büyüklüklerde ve farklı sahalarda) işletilmesi incelenmiştir. Sonuçlar, PtG kullanımının rüzgâr kısıtlamasında ve aynı zamanda ağ tıkanıklığı süresinde bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Jentsch(2013) ise, kurulu gücünün %85'i yenilenebilir olan Almanya elektrik şebekesinde, yenilenebilir kaynaklar tarafından üretilen besleme gücünü yıllık 30TWh'den 70 TWh'e çıkarması nedeniyle başarıyla sisteme entegre edilebileceğini göstermektedir.

3.2.3. Elektrik ve Gaz Şebekelerinin Bütünleşik Entegrasyonu

Elektrik iletim sistemi ve gaz şebekesi Gelişmiş ülkelerdeki iki ana altyapı bileşenidir. Qadrdan(2015) tarafından farklı ülkeler arasındaki etkileşimler göz önünde bulundurularak ortak analizler gerçekleştirilmiştir. Elektrik ve gaz şebekelerinin bütünleşmesi esneklik açısından yeni perspektifler açabilir(Devlin, 2016). Dicorato(2016) tarafından, gaz ve elektrik iletim şebekeleri arasındaki etkileşimler ve transfer limitleri nedeniyle elektrik ve gaz fiyatlarının oluşumları incelenmiştir. Bu bütünleşme gaz ve elektriğin belirli bir yük seviyesini karşılama gerektirdiği durumlarda, hem elektrik üretim maliyetinin hem de gaz maliyetinin optimize edilmesine izin vermektedir.

PtG'nin elektrik ve gaz iletim ağları üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılabilecek entegre bir model Clegg(2015) tarafından önerilmiştir: kağıt, hidrojen ve sentetik doğalgaz üreten büyük PtG tesislerini ele almaktadır. En somut etki, gaz şebekesi tıkanıklıklarının hafifletilmesidir. Depolama tesislerinin varlığı, sentetik doğalgaz üretiminin doğal gaz maliyeti üzerindeki etkisinin (gaz talebindeki azalmaya bağlı olarak) modellenebildiği Clegg(2016) tarafından ortaya koyulmaktadır. Gaz ve elektrik sistemlerini, karbondioksitle ilgili bir sektörle birlikte değerlendiren bir model önerilmiştir(Vandewalle, 2015). Çalışma, PtG'nin varlığının yukarıdaki tüm sektörleri birbirine bağladığını ve PtG'nin marjinal birim olduğu zaman gaz ve elektrik fiyatlarının değiştirilebildiğini göstermektedir. Wei(2016) tarafından önerilen olasılık yaklaşımı; iletim hatlarının mevcut transfer kapasitesini araştırmakta ve bir gaz şebekesinin güvenlik kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak, gaz yakıtlı tesislere verilen gazın kesintiye uğraması nedeniyle elektrik sistemindeki mecburi kesintilerden kaynaklanan potansiyel güvenlik tehdidini vurgulamaktadır.

Cheng(2017) entegre bir elektrik ve gaz şebekesini, doğrusal bir yaklaşım ile sunmaktadır. Bu yaklaşımda, şebekeler büyüktür (IEEE 39 düğümlü bir elektrik şebekesi bir NGS 48 düğümlü gaz şebekesi) ve Monte Carlo simülasyonu ile enerji talebindeki değişimleri normal dağılımlar olarak modellenmekte, rüzgar hızındaki belirsizlikler ise bilinen bir korelasyon matrisi ile Weibull dağılımı ile temsil edilmektedir. Sonuçlar, gaz akışı denklemlerinin basit doğrusal modelinin bazı endişelere yol açabileceğini gösterirken, çoklu lineer yaklaşımla bu sorunların üstesinden gelinebileceğini göstermektedir.

Pambour(2017)'un çalışmasında birleştirilmiş bir gaz/elektrik şebekelerinin arz güvenliğinin değerlendirilmesi ele alınmıştır. Çalışmada, gaz şebekesinin geçici bir hidrolik modelini, elektrik iletim sisteminin tam bir AC modeliyle birleştiren bir araç uygulanmıştır. Denklemler, birbirine bağlı iki sistem üzerindeki farklı kontrol stratejilerinin etkilerini yakalamak için aynı anda çözülmektedir.

Li(2017)'nin çalışmasında entegre gaz ve elektrik sisteminin kısa vadeli ekonomik dağıtımını gösterilmektedir. Bu çalışmadaki problem, üst düzey sorunun ekonomik olması nedeniyle iki düzeyli bir optimizasyon ile çözülmektedir. Alt düzey problem ise, birden fazla doğal gaz tedarikçisi olduğunda doğal gazın optimum paylaşımını ifade etmektedir. Keza, çalışmada hem elektrik hem de gaz sistemlerinin güvenlik kısıtlamaları göz önünde bulundurulmuştur.

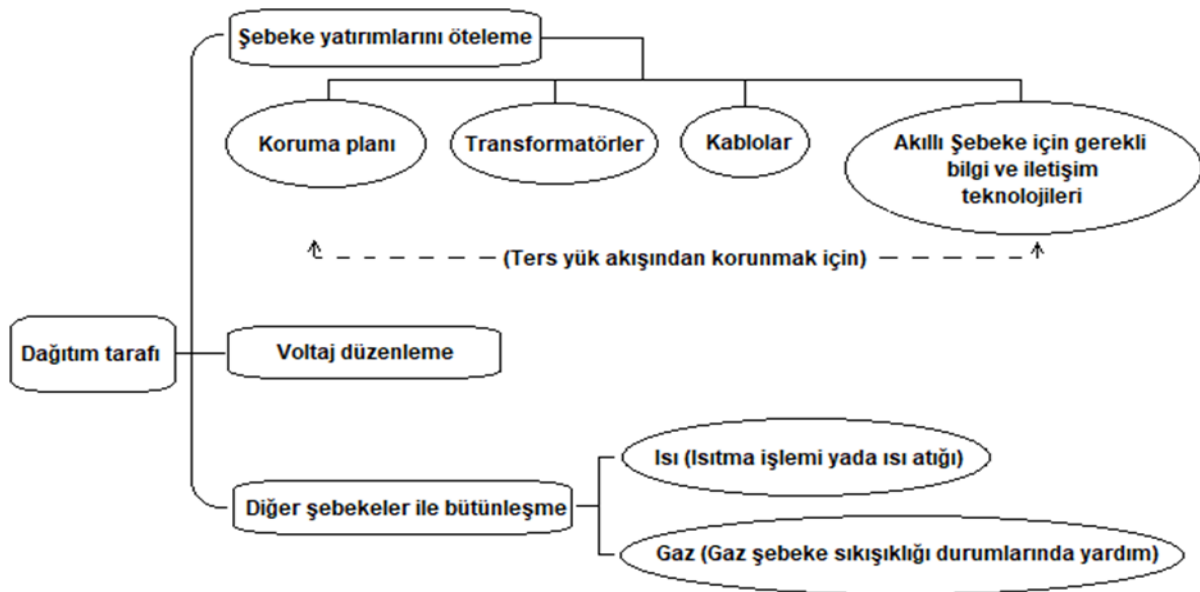
He(2017) ise, elektrik ve gaz sistemlerinin birlikte programlanmasını önermiştir: Makale farklı sahipliklere ait iki altyapının olasılığını göz önünde bulundurmakta ve sınırlı sayıda özel veri alışverişine dayanan bir yöntem sunmaktadır. Burada, bütünleşmiş bir sistemin genişleme planlaması da düşünülmüştür.

Zeng(2017)'nin çalışmasında: yatırım ve işletme maliyetlerinin toplamını en aza indirmek için iki seviyeli bir programlama kullanılmıştır. Algoritmada Danimarka şebekesi verileri kullanılmış, PtG ve gaz yakıtlı enerji santrallerinin kurulumundan kaynaklanan çift yönlü etkileşimleri dikkate alınmıştır.

3.2.4. Şebekelerde Tıkanıklık Yönetimi

Şebeke tıkanıklığı temel itibariyle; şebekenin güvenliği için belirlenen sıcaklık, gerilim ve kararlılık gibi değerleri aşmaksızın elektriğin iletilmesinde kapasite eksikliği nedeniyle oluşan iletim kısıtlarından nedeniyle oluşmaktadır. Diğer taraftan, bir elektrik şebekesine bağlı büyük güçlü yenilenebilir enerji santrallerinin varlığı, şebekede yüksek üretim sıklığına neden olabilir (Johnson, 2014). Bu sorunu çözmek ve enerji üretiminin azalmasını önlemek için, santrale yakın alanlarda enerji depolama sistemleri kurmak gerekmektedir.

Härtel(2016) şebeke tıkanıklıklarının yüksek bir payı olması durumunda farklı depolama seçeneklerinin maliyet değerlendirmesini sunmuştur. Bu çalışmasında; hem iletim şebekesi hem de dağıtım şebekesi ile ilgili vakaları göstermektedir ve farklı teknolojileri (piller, CAES, hidrojen ve metan) ele almaktadır. Ayrıca, bu çalışma tamamen şebeke perspektifinden gerçekleştirilmekte, yüksek yatırım maliyetleri ve depolama tesislerinin düşük kullanımı nedeniyle, sadece kısıtlanabilecek enerjiden yararlanmak için depolama teknolojilerinin kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varmıştır.



Şekil 5: Dağıtım tarafında PtG teknolojisi uygulamaları

3.3. Elektrik Dağıtım

Geçmişte, elektrik dağıtım şebekeleri sadece müşterilere enerji sağlama ve sadece tek bir tedarik noktasından aktif güç almaları nedeniyle pasif bir yapıya sahipti. Öte yandan, günümüzde özellikle kesikli ve dağınık bir yapıya sahip yenilenebilir enerji bazlı tesislerin çoğu şebekelere dağıtım seviyesinden bağlı durumdadır. Bu durum, dağıtım sistemlerinin çalışma şeklini oldukça değiştirmektedir. Zira bölgesel üretimden ve diğer dağıtık enerji kaynaklarından (depolama ve talep cevabı) birden fazla aktif güç girişi olan aktif ağlar haline gelmektedirler(Ochoa, 2010). Şekil 5’de Dağıtım tarafında PtG teknolojilerinin uygulama alanları özetlenmektedir.

Estermann(2016), Almanya’da yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip olan bir bölgede birkaç PtG tesisinin uygulanmasının fizibilitesini yapmıştır. Bu çalışma; tüketim yük profilleri ve 2015-2025 yılları arasında beklenen kapasiteler dikkate alınarak, analiz bölge genelinde birçok PtG tesisi kurarak aşırı güneş enerjisinin yaklaşık % 20’sinin absorbe edilebilmesinin mümkün olabileceğini vurgulamaktadır.

Härtel(2016) farklı dağıtım şebekelerinde, çok sayıda yenilenebilir enerji tesisinin kurulması nedeniyle tıkanıklıkların oranını inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, tıkanıklıkların oluşmasını önlemek için en uygun depolama teknolojisini bulmak amacıyla gerçek şebekelerde birkaç yıl boyunca meydana gelen tıkanıklıkları ifade eden bir kalıcı ve geçici veri kümeleri oluşturulmuştur. Yine bu durumda geri kazanılan enerji bedelinin, yatırım maliyetini karşılayamadığı görülmektedir. Diğer taraftan, maliyetin dışında, sistem güvenliği ile ilgili diğer etkilerin, örneğin büyük sistem tıkanıklıklarının giderilmesini sağlayacak bir önlemin dikkate alınmadığı görülmektedir.

Günümüze kadar dağıtım sistemleri, farklı gelişimleri ve tasarımları nedeniyle iletim sistemleri kadar etkin kontrol edilmemiştir. Ancak, sistemin işleyişine yaklaşım değişmekte ve ağın aktif kontrolüne doğru ilerlemektedir. Dalmou(2015) tarafından Yük Altında Kademe Değiştiriciyi (YAKD), rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynakları ve bir alkalın elektrolizörü dikkate alarak şebekede çalışma aralığında, voltaj kontrolünü sağlamanın bir örneği gösterilmiştir.

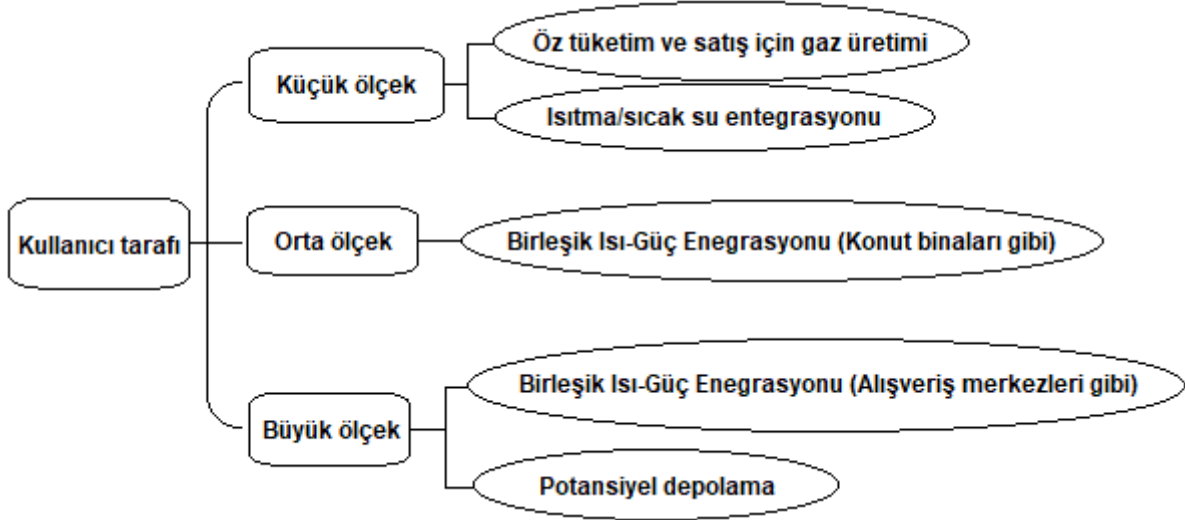
Diaz de Ceiro Mendaza(2015) tarafından orta gerilim ve yüksek gerilim hatlarına sahip şebekelerde PtG tesislerini planlamak için farklı hedeflerin toplamının düşünüldüğü bir ekonomik hedef fonksiyonuna dayanan optimizasyon örneği rapor edilmiştir. Keza, bir dağıtım şebekesindeki PtG tesislerinin optimum boyutlandırılması ve yerleştirilmesi de gösterilmiştir; burada amaç fonksiyonu, ağ kayıpları ile kurulu PtG tesislerinin sayısı arasında bir kombinasyondur. Bu durumda, PtG tesisi bir alkalın elektrolizörden oluştuğu görülmektedir.

Dağıtım sistemleri için önemli bir sonuç, Şekil 5’de gösterildiği gibi altyapılarını genişletmek için yatırımların ertelenmesidir. Ters güç akışının biraz sürekli olduğu büyük bir dağıtım şebekesinde, yeni transformatör tesis edilmesi, koruma seviyesinin yükseltilmesi ve cihazlar arasında iletişim için altyapıların başlatılması, maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, depolama tesislerinin (ve özellikle PtG) inşasının, şebekeye yapısal müdahalelere olan ihtiyacı geciktirerek sorunu hafifletip hafifletemeyeceğini ayrıca değerlendirmek mümkündür(Boicea, 2016).

3.4. Nihai Kullanıcı

Son (nihai) kullanım tarafına bakıldığında, birçok uygulama tüketim seviyesinde hidrojen kullanımına değinmektedir(Yunez-Cano, 2016). PtG’nin enerji şebekelerine bağlı yerel bir enerji sistemine dâhil edilmesi, genellikle elektrik piyasasında “prosumer” kavramının (elektrik şebekesine ilişkin hem üretici hem de elektrik tüketicisi olan veya kısaca üreten tüketicisi) farklı zaman dilimlerine yayılmasına katkıda bulunmaktadır. Birçok uygulamada PtG’yi içerecek şekilde uzatılmış olan “enerji hub” yaklaşımı önerilmektedir(Geidl, 2007). Murray(2017) tarafından yürütülen analizlerde, PtG bir enerji hub modeline dâhil edilmiş ve bir depolama seçeneği olarak kolaylığı, bölge düzeyinde uygulama için termal enerji depolama ile karşılaştırılmıştır. PtG, termal enerji depolamasına kıyasla yüksek ekonomik maliyetle sınırlı kalmasına rağmen, sera gazı emisyonlarını en aza indirmek için daha iyi bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte, müşteri düzeyinde metanasyon (ekzotermik bir reaksiyon) kullanımına ilişkin özel bir uygulama bulunmamaktadır. Bu uygulamanın temel sınırlamalarından biri H₂ depolama ve kullanım sistemindeki metanasyon donanımı için bir altyapı inşa etme ihtiyacıdır. Kullanıcı tarafı için PtG kullanım alanları Şekil 6'da özetlenmektedir.



Şekil 6: Kullanıcı tarafında PtG teknolojisi uygulamaları

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, elektriğin üretimi, iletimi, dağıtım ve nihai tüketim tarafı için PtG teknolojileri uygulamalarının kullanılmasının rolünü ve potansiyelini anlamaya yardımcı olmak, güncel çalışmalar ekseninde kavramsal bir çerçeve sunmaktadır. En ümit verici uygulamalardan biri, gaz ve elektrik iletim altyapılarının entegre yönetimi ve optimal işletimi ile ilgilidir. PtG, yenilenebilir enerji tabanlı tesisler tarafından üretilen elektriğin uzun süreli depolanmasını sağlamadaki potansiyel rolü nedeniyle son zamanlarda birçok ülke tarafından dikkatle incelenmekte ve uygulama imkânları araştırılmaktadır. PtG teknolojileri, yenilenebilir kaynakların kesikli üretimini filtreleyebilir ve elektrik şebekesinin en iyi şekilde çalışmasına yardımcı olabilmektedir.

Bu amaçla, elektrik ve gaz altyapılarının birlikte kullanılması, enerji şebekelerinin kullanımıyla ilgili kısıtlamaları hafifletebilir ve gaz şebekesi kısıtlamalarına yakın olduğunda daha fazla elektrik dağıtımını mümkün kılabilir. Bu şekilde, PtG çoklu enerji depolama sistemi olarak kullanılır ve farklı enerji vektörleri arasında bir geçiş mekanizması geliştirilebilir. Ancak, kullanılabilir diğer depolama teknolojileriyle ayrıntılı bir karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Bu karşılaştırma sadece elektrik depolama hizmetinin sağlanması için gereken toplam maliyet üzerinden yapılması eksik olacaktır. Esasen PtG teknolojileri, elektrokimyasal piller gibi diğer depolama teknolojileriyle rekabet etmez. Güvenilir bir karşılaştırma için; PtG'nin elektrikten gaza enerji kaydırma olanakları ve bunun tersi, gaz şebekesinde üretilen metanın kullanımı, farklı enerji vektörleri ile sağlanabilen sistemler için arbitraj fırsatları gibi diğer sistem hizmetlerine sağlayabileceği olası faydaları da hesaba katılmalıdır. Benzer faydalar elektrik dağıtım seviyesinde de görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekelerde yaygın olması durumunda, PtG teknolojisinin kullanımı dağıtım sisteminin altyapısının genişletilmesi/ve güçlendirilmesi konusundaki yatırımları erteleyebilmektedir. PtG'nin elektrik piyasaya içerisinde yer alması, dağıtım sistemi operatörü için aktif bir rol üstlenme anlamına da gelmektedir. Uygulamada, dağıtım sistemi operatörü şebekeye bağlı bir PtG sisteminin hem sahibi hem de yöneticisi olabilir veya şebeke hizmetlerini diğer kuruluşların sahip olduğu PtG sistemlerinden temin edebilme olanağı da bulmaktadır.

Hâlihazırda, PtG teknolojilerinin şebekelerde yaygınlaşmasının önündeki en büyük engelin yüksek kurulum maliyetleri olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, farklı boyutlarda PtG sistemleri elde

etmek için, modüler olarak birleştirilebilen bileşenlerin geliştirilmesi sonucunda bu üretim maliyetlerinin düşmesi beklenebilir. Keza, tüm bileşenlerin ölçekli üretimi, maliyetlerde önemli bir azalmaya yol açabilir ki bu durum bu teknolojileri enerji piyasasında rekabet edebilir konuma getirecektir.

Özetle, PtG teknolojisi muhtemelen gelecekteki enerji sistemlerinin önemli bir parçası haline gelecektir. Bu sebeple, bu çalışma PtG tesislerinin elektrik şebekeleri üzerindeki etkileri, potansiyel uygulamaları, PtG teknolojisinin yararları ve sınırlamalarının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

5. KAYNAKÇA

Leeuwen C.V., Mulder M. (2018) Power-to-gas in electricity markets dominated by renewables. *Applied Energy*, 232, 258–272.

Long G. (1978) Method of storing electric power, United States Patent #4,189,925.

Schiebahn S, Große T, Robinius M, Zhao L, Otto A, Kumar B, Weber M, Stolten D. (2013) Power to gas. In: Stolten D, Scherer V, editors. *Transition to renewable energy systems*. Wiley, 813–48. ISBN: 978-3-527-33239-7.

Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), (2010) Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). *Energy concept for an environmentally sound, reliable and affordable energy supply (PDF)*. Berlin, Germany: Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi).

Mancarella P, Chicco G. (2009) *Distributed multi-generation systems: energy models and analyses*. New York: Nova Science Publishers, ISBN: 978-1-60456-688-8.

Jenkins N, Ekanayake J, Strbac G. (2010) Distributed generation. IET, <http://dx.doi.org/10.1049/PBRN001E>.

Lund P.D, Lindgren J, Mikkola J, Salpakari J. (2015) Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renew Sustain Energy Rev.* 45, 785–807. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>.

Kondziella H, Bruckner T. (2016) Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems– a review of research results and methodologies. *Renew Sustain Energy Rev.* 53, 10–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.199>.

Belderbos A, Delarue E, D'haeseleer W. (2015) Possible role of power-to-gas in future energy systems, In: *Proceedings of the 12th international conference on the European energy market (EEM)*, Portugal (<http://dx.doi.org/10.1109/EEM.2015.7216744>).

Rönsch S, Schneider J, Matthischke S, Schlüter M, Götz M, Lefebvre J, Prabhakaran P, Bajohr S. (2016) Review on methanation – from fundamentals to current projects. *Fuel* 166, 276–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.111>.

Shahidehpour M, Alomoush M. (2002) *Restructured electric power systems: operation, trading, and volatility*. IEEE Book Review.

Römer B, Reichhart P, Kranz J, Picot A. (2012) The role of smart metering and decentralized electricity storage for smart grids: the importance of positive externalities. *Energy Policy* 50, 486–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.047>.

Joung M, Jinho K. (2013) Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability. *Appl Energy* 101, 441–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.009>.

Schettler F, Balavoine M-S, Callavik M, Corbett J, Kuljaca N, Larsen V.S, MacLeod N, Sonerud B. (2012) Roadmap to the supergrid technologies. WG2 - Technical Report (http://www.cesi.it/news_ideas/ideas/Documents/FOSG%20%20WG2%20Finalreport.pdf).

Lasseter R, Akhil A, Marnay C, Stephens J, Dagle J, Guttromson R, Meliopoulos A.S, Yinger R, Eto J. (2002) Integration of distributed energy resources. The CERTS Microgrid Concept, Technical Report (<https://escholarship.org/uc/item/9w88z7z1>).

Belderbos A, Delarue E, D'haeseleer W. (2015) Possible role of power-to-gas in future energy systems, In: Proceedings of the 12th international conference on the European energy market (EEM), Portugal (<http://dx.doi.org/10.1109/EEM.2015.7216744>).

Ursúa A, Gandía L.M, Sanchis P. (2012) Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proc IEEE 100, 410–26. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750>.

Vanderwalle J, Bruninx K, D'haeseleer W. (2015) Effects of large-scale power to gas conversion on the power, gas and carbon sectors and their interactions. Energy Convers Manag 94, 28–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.038>.

Kavalov B, Petric H, Georgakaki A. (2009) Liquefied natural Gas for Europe – some A. Mazza et al. important issues for consideration, JRC Reference Report (<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC47887/eur%2023818%20en.pdf>).

Reiter G, Lindorfer J. (2015) Evaluating CO₂ sources for power-to-gas applications – a case study for Austria. J CO₂ Util 10, 40–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcou.2015.03.003>.

Grond L, Schulze P, Holstein J. (2013) System analyses power to gas – deliverable 1: technology review. Final report, 1–70.

Johnson J.X, De Kleine R, Keoleian GA. (2014) Assessment of energy storage for transmission-constrained wind. Appl Energy 124, 377–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.006>.

Scamman D, Newborough M. (2016) Using surplus nuclear power for hydrogen mobility and power-to-gas in France. Int J Hydrog Energy 41, 10080–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.166>.

Tsupari E, Kärki J, Vakkilainen E (2015) Economic feasibility of power-to-gas integrated with biomass fired CHP plant. J Energy Storage. 5, 62–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2015.11.010>.

Bailera M, Lisbona P, Romeo L.M, Espatolero S. (2016) Power to Gas–biomass oxycombustion hybrid system: energy integration and potential applications. Appl Energy 167, 221–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.014>.

Bassano C, Deiana P, Pacetti L, Verdone N. (2015) Integration of SNG plants with carbon capture and storage technologies modelling. Fuel 161, 355–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.08.059>.

Mason I.G, Williamson A.G., (2010) A 100% renewable electricity generation system for New Zealand utilising hydro, wind, geothermal and biomass resources. Energy Policy 38, 3973–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.022>.

Bélanger C, Gagnon L. (2002) Adding wind energy power to hydropower. Energy Policy 30, 1279–84. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00089-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00089-7).

Gallo A.B, Simões-Moreira J.R., Costa H.K.M, Santos M.M, Mountinho, dos Santos E. (2016) Energy storage in the energy transition context: a technology review. Renew Sustain Energy 65, 800–922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>.

Härtel P, Doering M, Jentsch M, Pape C, Burges K, Kuwahata R. (2016) Cost assessment of storage options in a region with a high share of network congestions. J Energy Storage 8, 358–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2016.05.010>.

Guandalini G, Campanari S, Romano M. (2016) Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: energy and economic assessment. *Appl Energy* 147, 117–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.055>.

Ahern E.P, Deane P, Persson T, Ó Gallachóir B, Murphy J.D., (2015) A perspective on the potential role of renewable gas in a smart energy island system. *Renew Energy* 78, 648–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.048>.

Gutierrez-Martin F, Rodriguez-Anton L.M.. (2016) Power-to-SNG technology for energy storage at large scales. *Int J Hydrog Energy* 41, 19290–303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.097>.

Tuohy A, O'Malley M. (2012) Wind and power storage. In: Ackermann T, editor. *Wind in power systems* Wiley & Sons. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119941842.ch21>.

Bogdanov D, Breyer C. (2016) North-East Asian super grid for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Convers Manag* 112, 176–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.019>.

De Boer H.S, Grond L, Moll H, Benders R. (2014) The application of power-to-gas, pumped hydro storage and compressed air energy storage in an electricity system at different wind power penetration levels. *Energy* 72, 360–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.047>.

Heinisch V, Tuan L.A.. (2015) Effects of power-to-gas on power systems: a case study of Denmark. In: *Proceedings of IEEE Powertech, Eindhoven*. <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2015.7232587>.

Jentsch M, Trost T, Sterner M., (2013) Optimal use of power-to-gas energy storage systems in an 85% renewable energy scenario. In: *Proceedings of IRES 2013, Berlin* <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.180>.

Qadrdan M, Abeysekera M, Chaudry M, Wu J, Jenkins N. (2015) Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain. *Int J Hydrog Energy* 40, 5763–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.004>.

Devlin J, Li K, Higgins P, Foley A. (2016) A multi vector energy analysis for interconnected power and gas systems. *Appl Energy* 192, 315–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.040>.

Dicorato M, Forte G, Trovato M. (2016) Analysis of the interactions between electricity and gas system at European level. In: *Proceedings of EnergyCon, Belgium* <http://dx.doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514099>.

Clegg S, Mancarella P. (2015) Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks. *IEEE Trans Sustain Energy* 6, 1234–44. <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2015.2424885>.

Clegg S, Mancarella P. (2016) Storing renewables in the gas network: modelling of powerto-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems. *IET Gener Transm. Distrib* 10, 566–75. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0439>.

Vandewalle J, Bruninx K, D'haeseleer W. Effects of large-scale power to gas conversion on the power, gas and carbon sectors and their interactions. *Energy Convers Manag* 2015;94:28–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.038>.

Wei Z, Chen S, Sun G, Wang D, Sun Y, Zang H. (2016) Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems. *Appl Energy* 167, 305–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.015>.

Cheng S, Wei Z, Sun G, Cheung K.W, Sun Y., (2017) Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems. *IEEE Trans Power Syst* 32, 1970–9. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2597162>.

Pambour K.A, Erdener B.C, Bolado-Lavin R, Dijkema G.P.J., (2017) SAInt – A novel quasidynamic model for assessing security of supply in coupled gas and electricity transmission networks. *Appl Energy* 203, 829–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.142>.

Li G, Zhang R, Jiang T, Chen H, Bai L, Li X. (2017) Security-constrained bi-level economic dispatch model for integrated natural gas and electricity systems considering wind power and power-to-gas process. *Appl Energy* 194, 696–704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.077>.

He C, Wu L, Liu T, Shahidehpour M. (2017) Robust Co-optimization scheduling of electricity and natural gas systems via ADMM. *IEEE Trans Sustain Energy* 8, 658–70. <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2016.2615104>.

Zeng Q, Zhang B, Fang J, Chen Z. (2017) A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system. *Appl Energy* 200, 192–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.022>.

Ochoa L.F, Dent C.J, Harrison G.P.. (2010) Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks. *IEEE Trans Power Syst.* 25, 87–95. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2031223>.

Estermann T, Newborough M, Sterner M. (2016) Power-to-gas systems for absorbing excess solar power in electricity distribution networks. *Int J Hydrog Energy* 41, 13950–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.278>.

Dalmau A.R, Martinez-Perez D, Diaz de Ceiro Mendaza I, Pillai J. (2015) Decentralized voltage control coordination of on-load tap changer transformers, distributed generation units and flexible loads. In: *Proceedings of ISGT Asia, Bangkok*, 3-6. <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2015.7386966>.

Diaz de Ceiro Mendaza I, Bhattaria B, Kouzelis K, Pillai J, Bak-Jensen B, Jensen A. (2015) Optimal sizing and placement of power-to-gas systems in future active distribution networks. In: *Proceedings of ISGT Asia, Bangkok*. <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2015.7387053>

Boicea V.A., (2014) Energy storage technologies: the past and the present. *Proc IEEE* 102(11), 1777–94.

Yunez-Cano A, Gonzalez-Huerta R, Tufino-Velazquez M, Barbosa R, Escobar B. (2016) Solar-hydrogen hybrid system integrated to a sustainable house in Mexico. *Int J Hydrog Energy.* 41, 19539–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.203>.

Geidl M, Koepfel G, Favre-Perrod P, Klockl B, Andersson G, Frohlich K. (2007) Energy hubs for the future. *IEEE Power Energy Mag.* 5, 24–30. <http://dx.doi.org/10.1109/MPAE.2007.264850>.

Murray P, Omu A, Orehounig K, Carmeliet J. (2017) Power-to-gas for decentralized energy systems: development of an energy hub model for hydrogen storage. In: *Proceedings of the 15th IBPSA conference. San Francisco, CA*, 1740-9. <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2017.460>.

Mazza A, Bompard E, Chicco G., (2018) Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems. *Renew Sustain Energy Rev* 92, 794–806. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.072>

Perez-Arriaga I.J, Rudnick H, Rivier Abbd M. (2009) Electric energy system – an overview. In: *Gómez-Exposito A, Conejo AJ, Cañizares C, editors. Electric energy systems analysis and operation* CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420007275>.

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

Serdar Özyön*

**Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Merkez, Kütahya*

serdar.ozyon@dpu.edu.tr

**Sorumlu Yazar*

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan talebin giderek artması ve üretiminde kısıtlı kaynaklara bağlı olarak yapılabilmesinden dolayı, elektrik üretim sistemlerinin optimal olarak planlanması gereklidir. Optimal işletimin yanında enerji üretiminin tüketimden fazla olduğu zamanlarda da üretilen fazla enerjinin depolanması önemli konulardan biridir. Bu depolama sistemlerinden biri de Dünya’da birçok örneği bulunan termik ve pompayla doldurmalı (PD) hidrolik üretim birimlerinin birlikte kullanılmasıdır. Termik üretim birimlerine göre hidrolik kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi hem çevreye duyarlı hem de yakıt maliyeti olmayan bir seçenektir. Termik birimler tarafından üretilen enerji her ne kadar devamlılığı olsa da depolanma gereksinimi sorun oluşturmaktadır. İşte tam bu noktada PD hidrolik üretim birimleri büyük önem kazanmakta ve kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. PD hidrolik üretim birimlerinde temel amaç, elektrik üretim maliyeti düşük iken (düşük güç talebi) sistemde üretilebilecek olan fazladan enerjiyi hidrolik potansiyel enerji olarak depolamaktır. Depolanan bu enerji ile elektrik üretim maliyeti yüksek iken (yüksek güç talebi) elektrik enerjisi üretilerek sistemin enerji talebi karşılanmaktadır [1,2].

Belirli bir dönem boyunca elektrik üretim sistemlerinin optimal olarak işletimi, bu dönemde talep edilen yükü beslemek için sistemdeki üretim birimlerinin mevcut bütün kısıtları sağlayacak şekilde ve en ucuz üretim maliyeti ile çalıştırılması olarak tanımlanır. Literatürde termik ve PD hidrolik üretim birimlerinden oluşan sistemler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda problem farklı kısıtlar altında tasarlanarak farklı metotlar ile başarıyla çözülmüştür. Problem uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) algoritmasıyla çeşitli güvenlik kısıtları dikkate alınarak, aktif-reaktif güç optimizasyonu ile birlikte ve konveks maliyet fonksiyonları için [3]’de, probleme valf-noktası etkileri eklenerek konveks olmayan maliyet fonksiyonları için [4]’de, sözde spot fiyat algoritması (PSPA) ve genetik algoritma (GA) ile sadece aktif güç optimizasyonu yapılarak konveks maliyet fonksiyonları için [5]’de, aynı problem diferansiyel gelişim algoritması (DE) ile [2]’de, problem amaç fonksiyonuna çevresel etkilerde eklenerek çok amaçlı hale getirilip farklı çevrim verimi değerleri için F-MSG ve PSPA ile [6]’de, GA ile [7]’de ve son olarak PD hidrolik üretim birimi içeren farklı bir örnek, artırma-azaltma limitleri ve emre amade güç eşitsizlikleri de dikkate alınarak evrimsel parçacık sürü optimizasyonu (EPSO) ile [8]’de çözülmüştür.

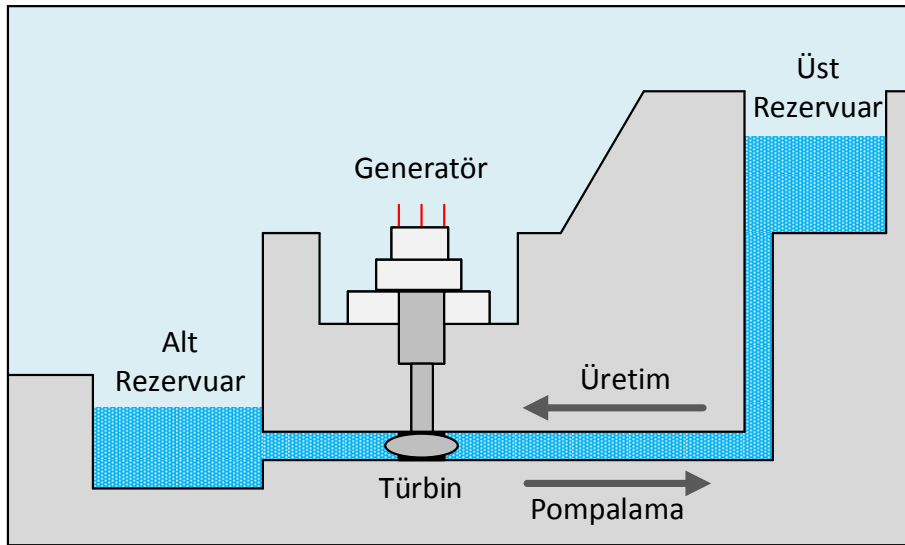
Literatürde çözümü yapılan örneklerden de görüldüğü üzere PD hidrolik üretim birimleri içeren sistemlerde optimal güç dağıtım problemi, çok fazla eşitlik ve eşitsizlik kısıtı içeren ve arama uzayında birçok yerel minimum noktası barındıran oldukça karmaşık bir problemdir. Günümüzde karmaşık ve nümerik yöntemlerle çözümü zor ya da imkânsız olan bu tür problemlerin çözümünde güçlü optimizasyon algoritmaları sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun nedeni, büyük arama uzaylarına sahip, çok sayıda kısıt içeren, çok boyutlu problemlerin nümerik yöntemlerle çözümlerinin çok uzun süreler alması ve optimizasyon algoritmalarının problem için kısa sürelerde kabul edilebilir bir çözüm sunmasıdır [2,9].

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

Bu çalışmada termik ve PD hidrolik üretim birimlerinden oluşan bir enerji üretim sisteminin optimal güç dağıtım problemi, diferansiyel gelişim algoritması (DE) ile yapılmıştır. Problem çözülürken iletim hattı kayıpları dikkate alınmış, valf nokta etkileri de probleme dahil edilerek termik üretim birimlerinin maliyet fonksiyonları konveks olmayan fonksiyonlar olarak belirlenmiştir. Problemin çözümünde yalnızca aktif güç optimizasyonu yapılmıştır. Örnek sistemin iletim hattı kayıpları Newton-Raphson metodu ile AC yük akışı yapılarak bulunmuştur. Örnek sistem PD hidrolik üretim birimi devre dışı ve devrede olarak iki farklı şekilde çözülmüş, yapılan bu çözümlerden elde edilen veriler ile PD hidrolik üretim birimlerinin sisteme sağladığı fayda ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Dünya'daki elektrik enerjisi üretiminin önemli bir kısmını karşılayan termik üretim birimleri çeşitli kısıtlardan dolayı ani yük değişimlerine kolay uyum sağlayamazlar. Bu nedenle bu tür üretim birimleri genellikle temel yükte çalıştırılırlar. Hidrolik üretim santralleri ise kısa sürede tam kapasite güce ulaşabilmelerinden dolayı tepe yükün karşılanmasında kullanılmaktadırlar. Sistemin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için tepe yük talebinin karşılanması önemlidir. Tepe yük talebinin karşılanmasında sıklıkla kullanılan bir diğer üretim birimi de PD hidrolik üretim birimleridir. Bu üretim birimlerinin amacı yükün düşük olduğu durumlarda suyu yüksekte bulunan rezervuarda depolamak, tepe yük talebi durumunda ise depolanan su ile enerji elde etmektir. PD hidrolik birimlerde üretim ve pompalama olmak üzere iki tip çalışma şekli mevcuttur. Bu üretim birimlerine ait şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir [2].



Şekil 1. PD hidrolik üretim birimlerinin şematik gösterimi

PD hidrolik üretim birimi bulunduran sistemlerde optimal güç dağıtım probleminin çözümü, öngörülen işletim süresi (j_{max}) boyunca toplam yakıt maliyetini (TYM) minimum yapan, sistemdeki olası bütün elektriksel ve hidrolik kısıtların sağlandığı üretim birimlerinin aktif güç üretim değerlerini bulmaktır [2]. Bu durumda belirlenen optimizasyon algoritması tarafından minimize edilecek (TYM) fonksiyonu denklem (1)'de verilmiştir. Denklemde (t_j) her periyodun süresini göstermektedir [2,9].

$$TYM = \min \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{n \in N_r} F_n(P_{GT,nj}) \cdot t_j, (\$) \quad 1)$$

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

Genel olarak, valf nokta etkileri de dikkate alındığında her bir termik üretim birimi için yakıt maliyeti fonksiyonu ikinci dereceden konveks olmayan bir fonksiyonla gösterilmektedir. Her bir üretim biriminin yakıt maliyet fonksiyonu denklem (2)'deki gibi alınmıştır [2,4].

$$F_n(P_{GT,n}) = a_n + b_n \cdot P_{GT,n} + c_n \cdot P_{GT,n}^2 + \left| e_n \cdot \sin \left(f_n \cdot (P_{GT,n}^{\min} - P_{GT,n}) \right) \right| (\$/h), \quad n \in N_T \quad 2)$$

Denklemden $F_n(P_{GT,n})$, n . üretim biriminin yakıt maliyet fonksiyonunu, a_n , b_n , c_n , e_n ve f_n katsayıları n . üretim biriminin maliyet fonksiyonu katsayılarını, $P_{GT,n}$ ise n . termik üretim biriminin çıkış gücünü göstermektedir ve birimi MW olarak alınmaktadır.

Termik üretim birimleri ve PD hidrolik üretim biriminden oluşan kayıplı bir sistemdeki aktif güç denge kısıtları pompalama durumu için denklem (3)'de üretim durumu için denklem (4)'de gösterilmiştir. Sistemdeki reaktif güç denge kısıtları ise pompalama durumu için denklem (5)'de üretim durumu için denklem (6)'da gösterilmiştir [2].

$$\sum_{n \in N_T} P_{GT,nj} - P_{PPD,j} - P_{yük,j} - P_{kayıp,j} = 0, \quad j \in J_{pomp} \quad 3)$$

$$\sum_{n \in N_T} P_{GT,nj} + P_{GPD,j} - P_{yük,j} - P_{kayıp,j} = 0, \quad j \in J_{gen} \quad 4)$$

$$\sum_{n \in N_T} Q_{GT,nj} - Q_{PPD,j} - Q_{yük,j} - Q_{kayıp,j} = 0, \quad j \in J_{pomp} \quad 5)$$

$$\sum_{n \in N_T} Q_{GT,nj} + Q_{GPD,j} - Q_{yük,j} - Q_{kayıp,j} = 0, \quad j \in J_{gen} \quad 6)$$

Sistemdeki termik üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç çalışma sınır değerleri denklem (7) ve (8)'de verilmiştir [2,4].

$$P_{GT,n}^{\min} \leq P_{GT,nj} \leq P_{GT,n}^{\max}, \quad n \in N_T, \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad 7)$$

$$Q_{GT,n}^{\min} \leq Q_{GT,nj} \leq Q_{GT,n}^{\max}, \quad n \in N_T, \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad 8)$$

Sistemde yer alan PD hidrolik üretim birimlerine ait elektriksel kısıtlar denklem (9)-(12)'de, hidrolik kısıtlar ise denklem (13)-(22)'de verilmiştir [2].

$$P_{GPD,m}^{\min} \leq P_{GPD,mj} \leq P_{GPD,m}^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{gen} \quad 9)$$

$$P_{PPD,m}^{\min} \leq |P_{PPD,mj}| \leq P_{PPD,m}^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{pomp} \quad 10)$$

$$Q_{GPD,m}^{\min} \leq Q_{GPD,mj} \leq Q_{GPD,m}^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{gen} \quad 11)$$

$$Q_{PPD,m}^{\min} \leq |Q_{PPD,mj}| \leq Q_{PPD,m}^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{pomp} \quad 12)$$

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

$$q_m^{\min} \leq q_{mj}(P_{GPD,mj}) \leq q_m^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{gen} \quad (13)$$

$$q_m^{\min} \leq q_{mj}(|P_{PPD,mj}|) \leq q_m^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{pomp} \quad (14)$$

$$q_{GPD}(P_{GPD,mj}) = \begin{cases} 200 + g \cdot P_{GPD,mj} \text{ (acre-ft/h) eğer } 0 < P_{GPD,mj} \leq P_{GPD}^{\max} \\ 0 \text{ (acre-ft/h) eğer } P_{GPD,mj} = 0 \end{cases}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{gen} \quad (15)$$

$$q_{PPD}(|P_{PPD,mj}|) = \begin{cases} 200 + h \cdot |P_{PPD,mj}| \text{ (acre-ft/h) eğer } 0 < |P_{PPD,mj}| \leq P_{PPD}^{\max} \\ 0 \text{ (acre-ft/h) eğer } |P_{PPD,mj}| = 0 \end{cases}, \quad m \in N_{PD}, \quad j \in J_{pomp} \quad (16)$$

$$q_{GPD,toplam} = \sum_{j \in J_{gen}} q_{GPD}(P_{GPD,mj}) \cdot t_j, \quad m \in N_{PD} \quad (17)$$

$$q_{PPD,toplam} = \sum_{j \in J_{pomp}} q_{PPD}(|P_{PPD,mj}|) \cdot t_j, \quad m \in N_{PD} \quad (18)$$

$$q_{GPD,toplam} - q_{PPD,toplam} = q_{toplam} = 0 \quad (19)$$

$$V_m^{\min} \leq V_{mj} \leq V_m^{\max}, \quad m \in N_{PD}, \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (20)$$

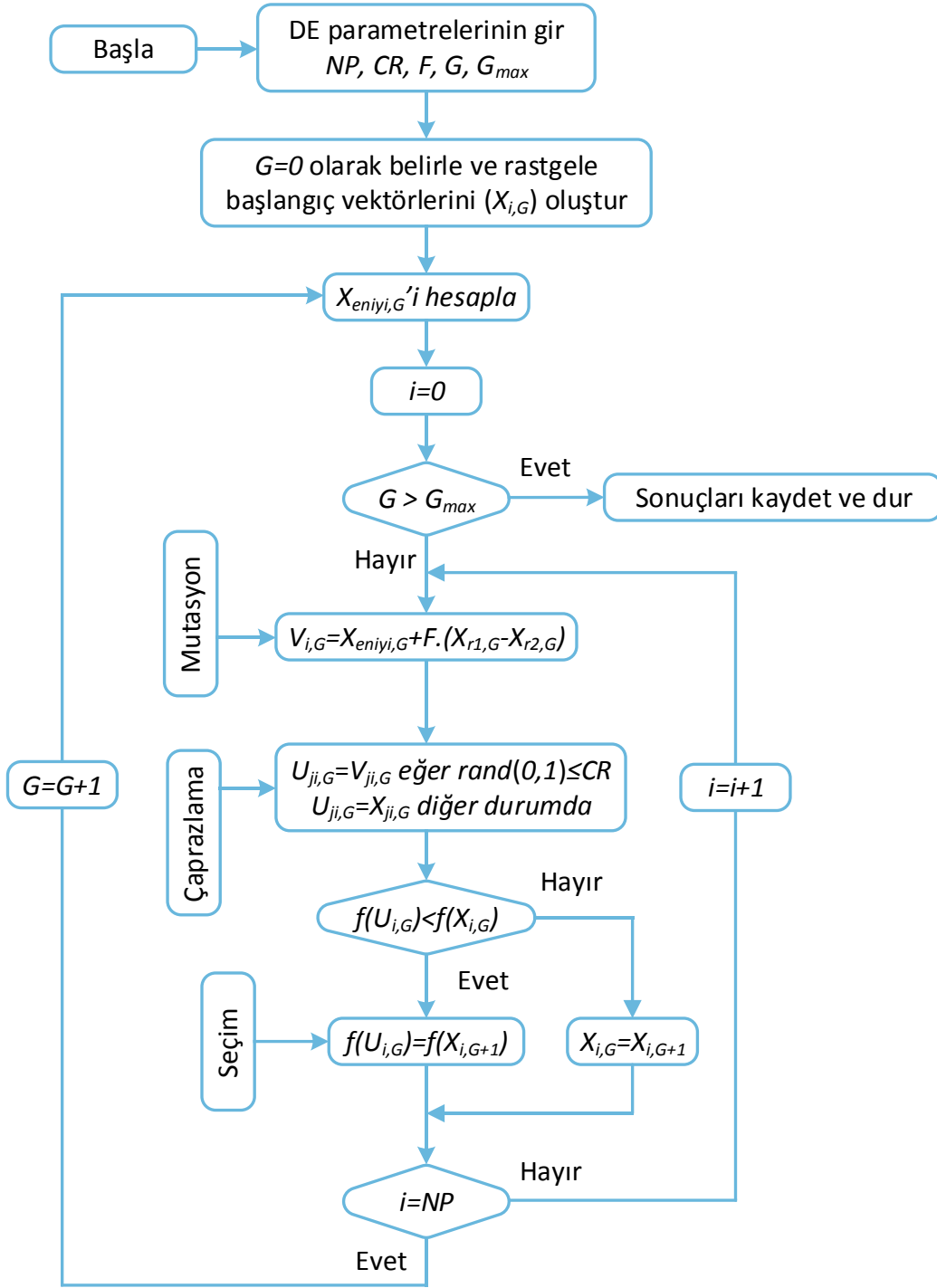
$$V_{mj} = \begin{cases} V_{mj-1} - q_{GPD}(P_{GPD,mj}) \cdot t_j \text{ eğer } j \in J_{gen} \\ V_{mj-1} + q_{PPD}(|P_{PPD,mj}|) \cdot t_j \text{ eğer } j \in J_{pomp} \end{cases}, \quad m \in N_{PD} \quad (21)$$

$$V_{m0} = V_{mj}^{\max} = V_m^{başlangıç} = V_m^{bitiş} \quad (22)$$

3. DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI (DGA)

DE, mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerinden oluşan popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Ana arama stratejisi olarak mutasyon operatörünü kullanır ve yapılan aramayı potansiyel çözüm bölgesine yönlendirmek için seçim operatörünü kullanır. Algoritmada birincil ve ikincil olmak üzere iki dizi oluşturulur. Her iki dizi de NP sayıda potansiyel çözümden oluşur ve her bir çözüm D sayıda değişken içerir. Bu çözümler gerçek değerli vektörlerdir. Kısaca başlangıçta, NP sayıda D boyutlu vektör vardır. Tüm vektörlerin toplamına bir popülasyon denir. Algoritma bu haliyle ilk kez Storn ve Price tarafından, 1997 yılında önerilmiştir. Algoritmanın akış diyagramı Şekil 2’de verilmiştir [10, 11].

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI



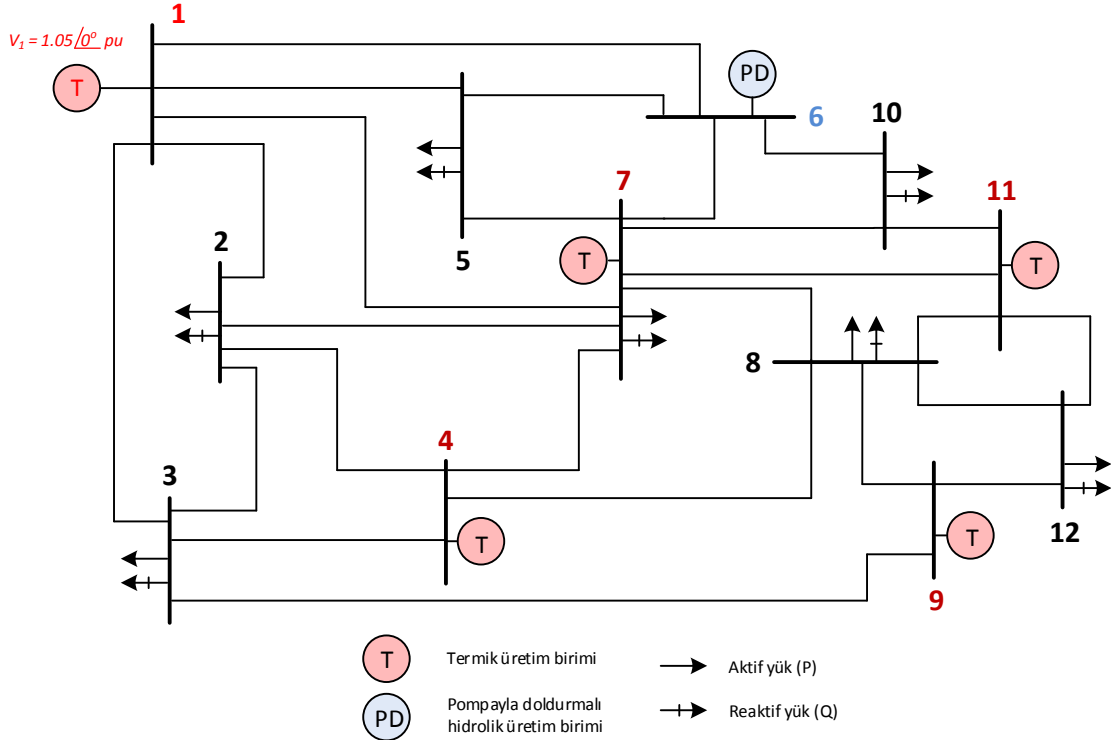
Şekil 2. DE algoritmasına ait akış diyagramı

4. SAYISAL UYGULAMALAR

PD hidrolik üretim birimi bulunduran sistemlerde optimal güç dağıtım problemi için seçilen örnek sistemin tek hat diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Bu güç sisteminde 12 adet bara, 5 adet termik üretim birimi, 1 adet PD hidrolik üretim birimi, 25 adet iletim hattı ve 7 adet yük barası bulunmaktadır [2,4]. Sistemin çözümünde kullanılan bütün değerler ve elde edilen sonuçlar pu olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan baz değerler ise $S_{baz}=100$ MVA, $V_{baz}=230$ kV ve $Z_{baz}=529$ Ohm'dur. Bu sistem için literatürdeki bütün çalışmalarda 1. bara salınım barası olarak seçilmiştir. Salınım barası

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

için sabit, bara gerilim değeri $V_i = 1,05 \angle 0^\circ$ pu olarak alınmıştır. Örnek sistem DE algoritması ile iletim hattı kayıpları dikkate alınarak iki durum için çözülmüştür. Birinci durumda sistemdeki PD hidrolik üretim birimi devre dışı edilerek toplam yakıt maliyeti minimize edilmiştir. İkinci durumda ise sistemdeki PD hidrolik üretim birimi devreye alınarak aynı yük talebi altında toplam yakıt maliyeti hesaplanarak, PD hidrolik üretim biriminin toplam yakıt maliyeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu çalışmada iletim hattı kayıpları Newton-Raphson metoduyla AC yük akışı yapılarak bulunmuştur.



Şekil 3. Örnek güç sisteminin tek hat diyagramı

4.1. Pompayla Doldurmalı Hidrolik Üretim Birimi Devre Dışı

Birinci durumda, PD hidrolik üretim birimi devre dışı bırakılarak, örnek sistem tarafından talep edilen gücün sadece termik üretim birimleri ile karşılandığı varsayılarak çözüm yapılmıştır. Sistemin çözümünde dörder saatlik altı eşit zaman diliminden ($t_j = 4s, j = 1, \dots, j_{max}$) oluşan bir günlük (kısa dönem) işletim süresi göz önüne alınmıştır.

Örnek sistemdeki iletim hatlarına ait nominal π eşdeğer devrelerinin hat parametreleri (R, X, B) değerleri pu olarak Tablo 1'de, her bir periyotta yük baralarındaki aktif ve reaktif yük değerleri Tablo 2'de, üretim birimlerine ait her bir zaman dilimindeki başlangıç reaktif güç değerleri Tablo 3'de, termik üretim birimlerine ait konveks olmayan yakıt maliyet fonksiyonu katsayıları ve bu birimlerin aktif ve reaktif güç üretim sınırları Tablo 4'de gösterilmiştir [2,4].

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

Tablo 1. İletim hattı parametreleri

Hat No	Bara no (n)		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Barada n	Baraya			
1	1	2	0,070	0,180	0,025
2	1	3	0,080	0,250	0,025
3	1	5	0,080	0,200	0,020
4	1	6	0,050	0,150	0,015
5	1	7	0,080	0,250	0,025
6	2	3	0,050	0,200	0,020
7	2	4	0,070	0,200	0,020
8	2	7	0,080	0,180	0,018
9	3	4	0,080	0,250	0,025
10	3	9	0,100	0,300	0,030
11	4	7	0,050	0,150	0,015
12	4	8	0,100	0,300	0,030
13	5	6	0,100	0,300	0,030
14	5	7	0,080	0,200	0,020
15	6	7	0,060	0,180	0,018
16	6	10	0,080	0,250	0,025
17	7	8	0,080	0,250	0,025
18	7	10	0,060	0,180	0,018
19	7	11	0,080	0,250	0,025
20	8	9	0,060	0,180	0,018
21	8	11	0,080	0,300	0,030
22	8	12	0,100	0,300	0,030
23	9	12	0,080	0,250	0,025
24	10	11	0,060	0,200	0,020
25	11	12	0,060	0,180	0,018

Tablo 2. Aktif ve reaktif yükler

Bara no (n)		Periyot (j)					
		1	2	3	4	5	6
2	P	0,20	0,80	1,00	0,80	0,40	0,20
	Q	0,15	0,60	0,75	0,60	0,30	0,15
3	P	0,50	1,10	1,20	1,10	0,60	0,50
	Q	0,40	0,85	0,90	0,85	0,45	0,40
5	P	0,30	0,90	0,80	0,90	0,25	0,30
	Q	0,24	0,70	0,60	0,70	0,20	0,24
7	P	0,25	1,00	1,10	1,00	0,50	0,25
	Q	0,20	0,75	0,85	0,75	0,40	0,20
8	P	0,40	0,70	0,90	0,70	0,30	0,40
	Q	0,30	0,52	0,70	0,52	0,24	0,30
10	P	0,15	0,60	1,05	0,60	0,45	0,15
	Q	0,12	0,45	0,80	0,45	0,35	0,12
12	P	0,20	0,90	0,95	0,90	0,50	0,20
	Q	0,15	0,70	0,75	0,70	0,40	0,15
ΣP		2,00	6,00	7,00	6,00	3,00	2,00
ΣQ		1,56	4,57	5,35	4,57	2,34	1,56

Tablo 3. Başlangıç reaktif güç değerleri

Bara no (n)	Periyot (j)					
	1	2	3	4	5	6
4	0,080	0,700	1,000	0,700	0,200	0,080
7	0,080	0,700	1,000	0,700	0,200	0,080
9	0,080	0,700	1,000	0,700	0,200	0,080
11	0,080	0,700	1,000	0,700	0,200	0,080

Tablo 4. Termik üretim birimlerine ait yakıt maliyet katsayıları ve üretim sınırları

Bara no (n)	1	4	7	9	11
a_n	527,0	561,0	310,0	476,0	460,0
b_n	7,48	7,92	7,85	9,52	9,40
c_n	0,001495	0,001562	0,001940	0,004360	0,003970
e_n	5,0	7,5	5,0	10,0	15,0
f_n	0,075	0,075	0,125	0,200	0,250
$P_{GT,n}^{\min}$ (MW)	50,0	45,0	40,0	5,0	3,0
$P_{GT,n}^{\max}$ (MW)	350,0	180,0	175,0	100,0	100

Her iki durum için kullanılan DE parametre değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Problemlerin çözümü için MATLAB R2015b’de geliştirilen program parçaları Intel Xeon E5-2637 v4 3,50 GHz işlemcili ve 128 GB RAM bellekli iş istasyonunda çalıştırılmıştır. Algoritmanın çalıştırıldığı makine özellikleri süre karşılaştırmaları bakımından önemlidir.

Tablo 5. DE parametreleri

İterasyon Sayısı	Birey Sayısı	Fonksiyon Çağırımı	Çaprazlama Oranı	Ölçekleme Faktörü	Çözüm Sayısı
500	50	25000	0,8	0,4	10

Tablo 5’de verilen parametre değerleri ile 10 kez çözümü yapılan probleme ait istatistikî değerler Tablo 6’da verilmiştir. Bu çözümlerden eniyi çözüme ait güç üretim değerleri, iletim hattı kaybı ve çözüm süresi ise Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. 10 kez çözümden elde edilen değerler (PD birim devre dışı)

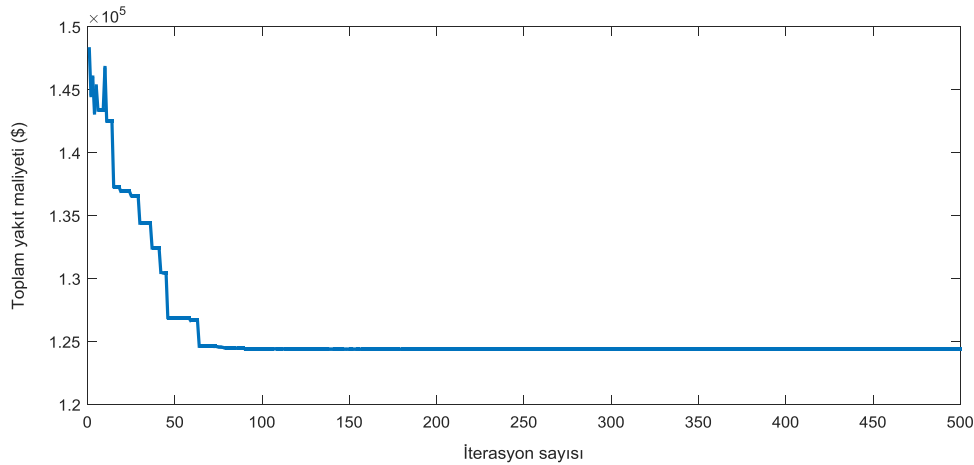
	DE
Enkötü	128061,089780
Ortalama	125512,610677
Eniyi	124382,500879
Std Sapma	1508,816694
Toplam süre (sn)	1910,805274
Ortalama süre (sn)	191,080527

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

Tablo 7. En iyi çözüme ait değerler (PD birim devre dışı)

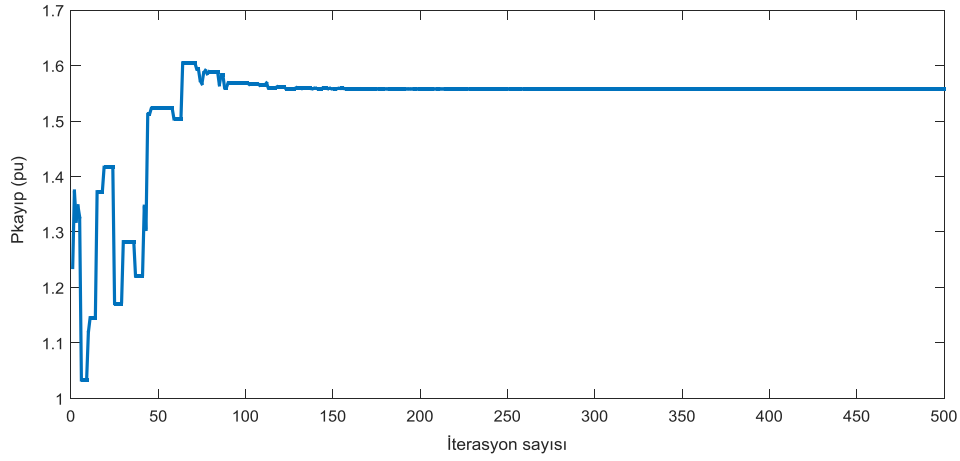
Bara no (n)	Üretim (pu)	Periyot (j)					
		1	2	3	4	5	6
1	$P_{GT,1}$	0,94015 1	2,99650 5	3,03420 2	2,99650 5	1,33313 2	0,94015 1
	$Q_{GT,1}$	0,79245 6	2,63079 9	2,22419 5	2,63079 9	1,31419 2	0,79245 6
4	$P_{GT,4}$	0,45000 0	1,70663 7	1,80000 0	1,70663 7	0,86887 9	0,45000 0
7	$P_{GT,7}$	0,65132 7	1,75000 0	1,75000 0	1,75000 0	0,90265 5	0,65132 7
9	$P_{GT,9}$	-	-	-	-	-	-
11	$P_{GT,11}$	-	-	0,87964 6	-	-	-
TYM (\$)		124382,500879					
$P_{kayıp}$ (pu)		1,557756					
Süre (sn)		194,230927					

Örnek sistemin DE algoritmasıyla 10 kez çözümünden elde edilen eniyi çözüme ait TYM 'nin iterasyonlara göre değişimi Şekil 4'de, iletim hattı kaybının iterasyonlara göre değişimi Şekil 5'de ve her periyotta üretilen aktif güçler Şekil 6'da verilmiştir.

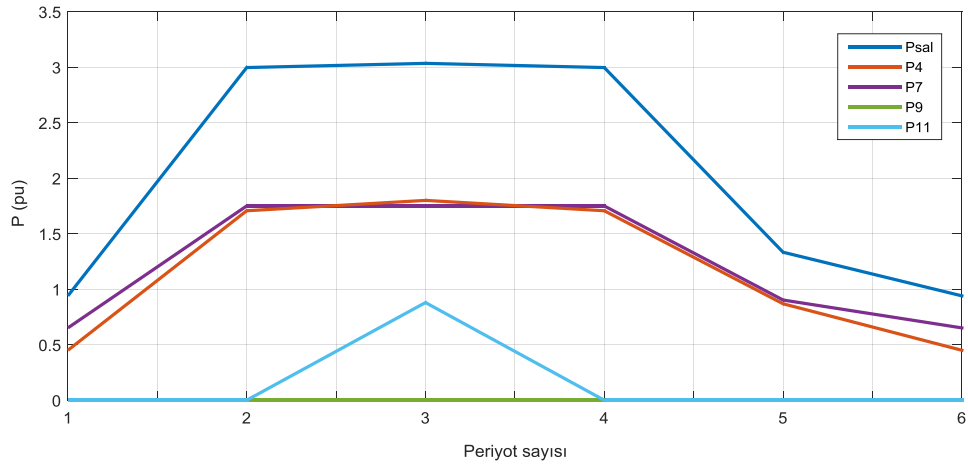


Şekil 4. TYM 'nin iterasyonlara göre değişimi (PD birim devre dışı)

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI



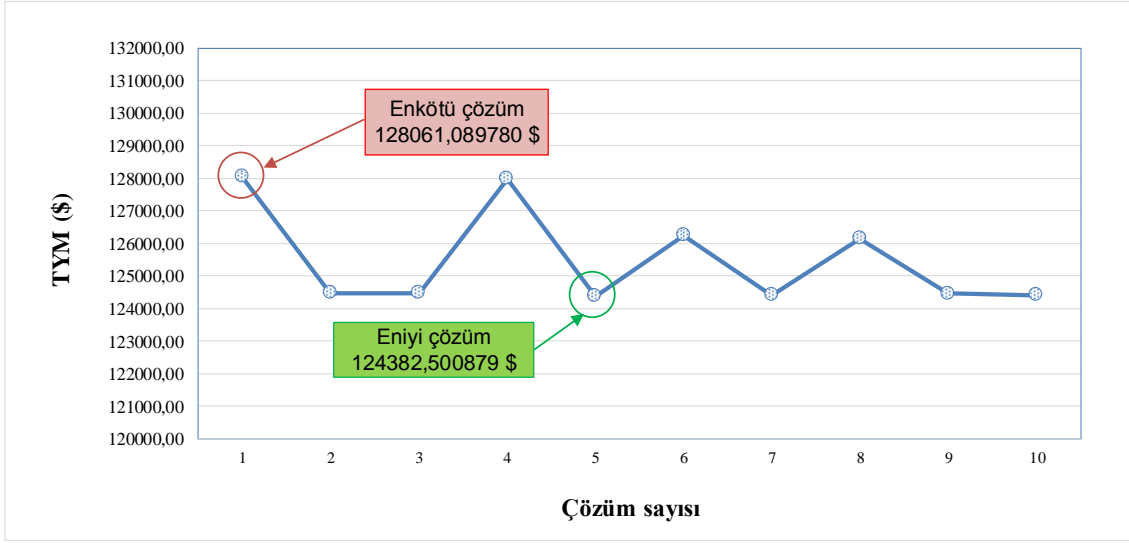
Şekil 5. $P_{kayıp}$ 'ın iterasyonlara göre değişimi (PD birim devre dışı)



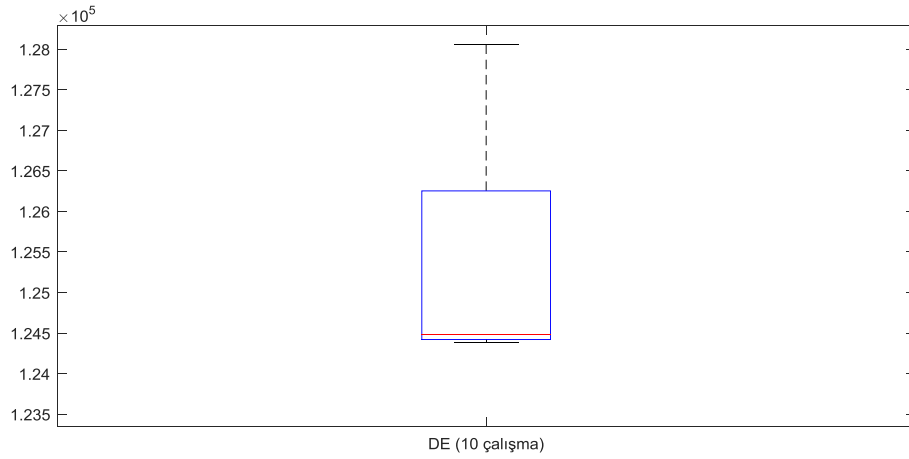
Şekil 6. Üretilen aktif güçlerin periyotlara göre değişimi (PD birim devre dışı)

PD hidrolik üretim biriminin devre dışı olduğu durum için yapılan 10 çözümden elde edilen bütün TYM 'lerinin yer aldığı grafik Şekil 7'de ve bu çözümlere ait kutu grafiği ise Şekil 8'de verilmiştir.

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI



Şekil 7. 10 kez çalışmada elde edilen TYM değerleri (PD birim devre dışı)



Şekil 8. 10 çalışma için kutu grafiği (PD birim devre dışı)

Tablo 7 ve Şekil 7 incelendiğinde, PD hidrolik üretim biriminin devre dışı olduğu durum için örnek sistemin DE ile 10 kez çözülmesinde, enkötü maliyet değerinin 1. çözümde 128061,089780 \$ olarak, eniyi maliyet değerinin ise 5. çözümde 124382,500879 \$ olarak elde edildiği görülmektedir. DE algoritması 10 çözümde bütün kısıtları sağlayan 3678,5889 \$'lık aralıkta arama yapmıştır.

4.2. Pompayla Doldurmalı Hidrolik Üretim Birimi Devrede

İkinci durumda ise PD hidrolik üretim biriminin güç dağıtımı üzerine sağladığı faydanın belirlenebilmesi için, örnek sistemdeki altıncı baraya Tablo 8'de özellikleri verilen bir PD hidrolik üretim birimi bağlanarak çözüm yapılmıştır. Karşılaştırmaların daha doğru bir şekilde yapılabilmesi için her iki durumda da PD hidrolik birimin reaktif üretimi ve reaktif pompalama yükü 0 MVA_r olarak alınmıştır.

Tablo 8. PD hidrolik üretim birimine ait parametreler

Bara No 6	P_{GPD}^{\min} P_{PPD}^{\min} (MW)		P_{GPD}^{\max} P_{PPD}^{\max} (MW)		g	h
	0		130		2,0	1,33
	V^{ilk} (acre-ft)	V^{son} (acre-ft)	V^{min} (acre-ft)	V^{max} (acre-ft)	Verim (g/h = μ)	
	10000	10000	5000	15000	0,67	

Durum-II için 10 kez çözümü yapılan probleme ait istatistiki değerler Tablo 9’da verilmiştir. Bu çözümlerden eniyi çözüme ait güç üretim değerleri, iletim hattı kaybı ve çözüm süresi ise Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 9. 10 kez çözümden elde edilen değerler (PD birim devrede)

	DE
Enkötü	124648,117071
Ortalama	124144,437177
Eniyi	123713,485620
Std Sapma	350,502712
Toplam süre (sn)	2051,104837
Ortalama süre (sn)	205,110484

Tablo 9 incelendiğinde, PD hidrolik üretim birimi devreye alındığı durum için örnek sistemin DE ile 10 kez çözülmesinde, enkötü maliyet değerinin 5. çözümde 124648,117071 \$ olarak, eniyi maliyet değerinin ise 3. çözümde 123713,485620 \$ olarak elde edildiği görülmektedir. Bu durum için DE algoritması 10 çözümde bütün kısıtları sağlayan 934,6314 \$’lık aralıkta arama yapmıştır.

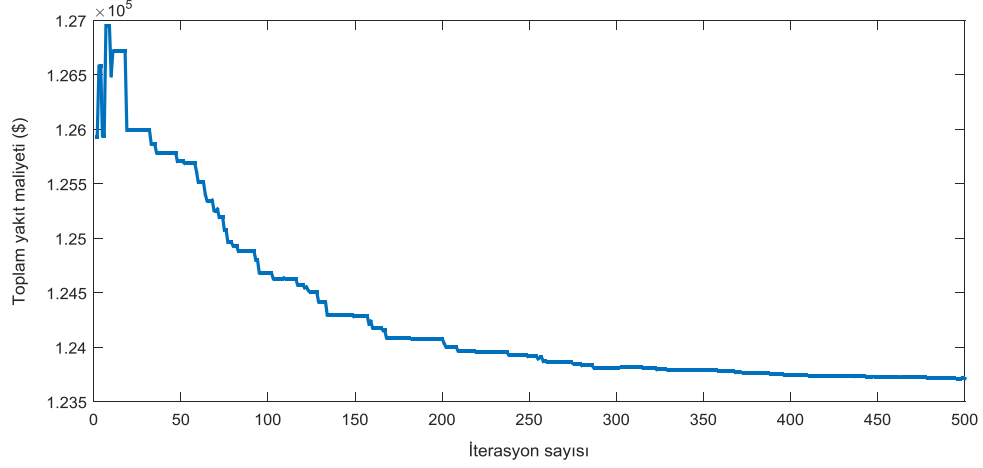
Tablo 10. En iyi çözüme ait değerler (PD birim devrede)

Bara no (n)	Üretim (pu)	Periyot (j)					
		1	2	3	4	5	6
1	$P_{GT,1}$	1 ,455863	2 ,990116	3 ,498352	2 ,976508	1 ,336535	1 ,126020
	$Q_{GT,1}$	0 ,858573	2 ,629793	2 ,845547	2 ,626185	1 ,314534	0 ,806985
4	$P_{GT,4}$	0 ,454447	1 ,712269	1 ,798937	1 ,712929	0 ,868927	0 ,453107
6	$P_{PD,6}$	- 0,75142 4	0 ,002284	0 ,611212	0 ,012222	- 0,00415 9	- 0,18302 1
7	$P_{GT,7}$	0 ,902983	1 ,748153	1 ,749133	1 ,750000	0 ,903466	0 ,649529
9	$P_{GT,9}$	-	-	-	-	-	-
11	$P_{GT,11}$	-	-	-	-	-	-
$V^{\text{bitiş}}$		10000,014974					
TYM (\$)		123713,485620					
$P_{\text{kayıp}}$ (pu)		1,774390					
Süre (sn)		206,277979					

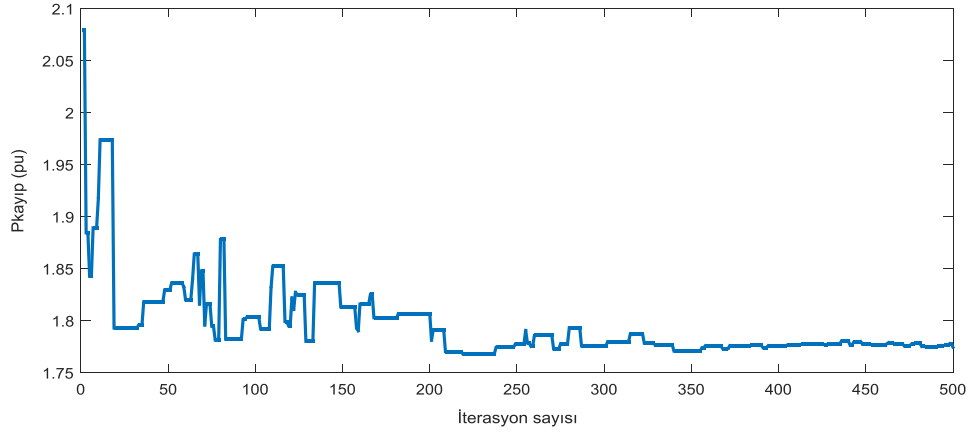
İkinci durumda örnek sistemin DE algoritmasıyla 10 kez çözümünden elde edilen eniyi çözüme ait TYM’nin iterasyonlara göre değişimi Şekil 9’da, iletim hattı kaybının iterasyonlara göre değişimi Şekil 10’da, PD hidrolik üretim biriminin her iterasyon sonunda üst rezervuarındaki su miktarı

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

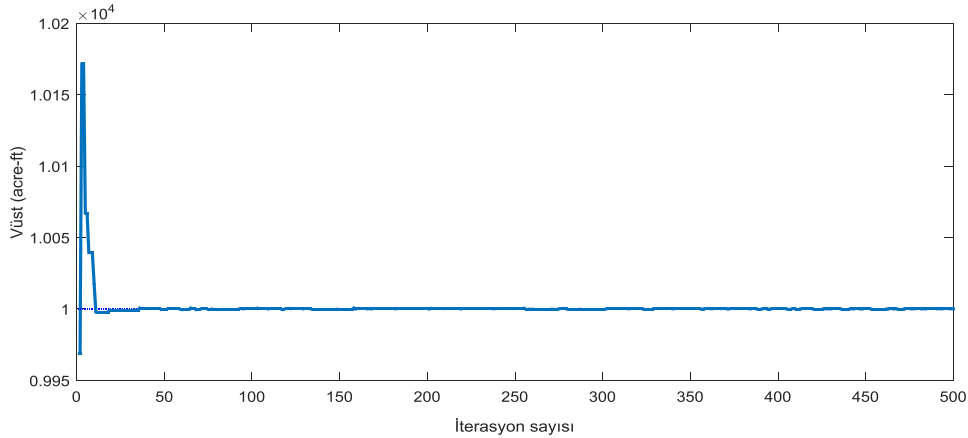
Şekil-11’de, her periyotta üretilen aktif güçler Şekil 12’de, PD hidrolik üretim birimi tarafından her periyotta salınan-pompalanan su miktarları Şekil 13’de ve PD hidrolik üretim biriminin işletim süresi boyunca her periyot sonunda üst rezervuarındaki su miktarları Şekil 14’de verilmiştir,



Şekil 9. T_{YM} 'nin iterasyonlara göre değişimi (PD birim devrede)

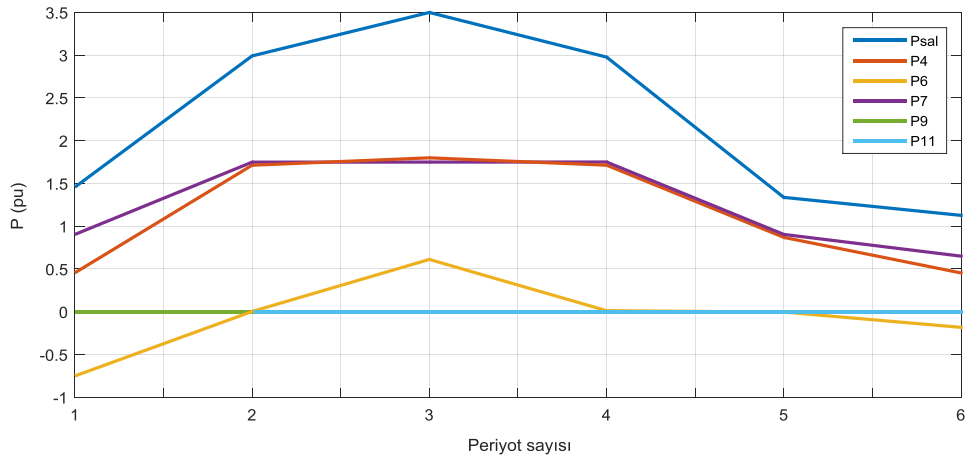


Şekil 10. $P_{kayıp}$ 'ın iterasyonlara göre değişimi (PD birim devrede)

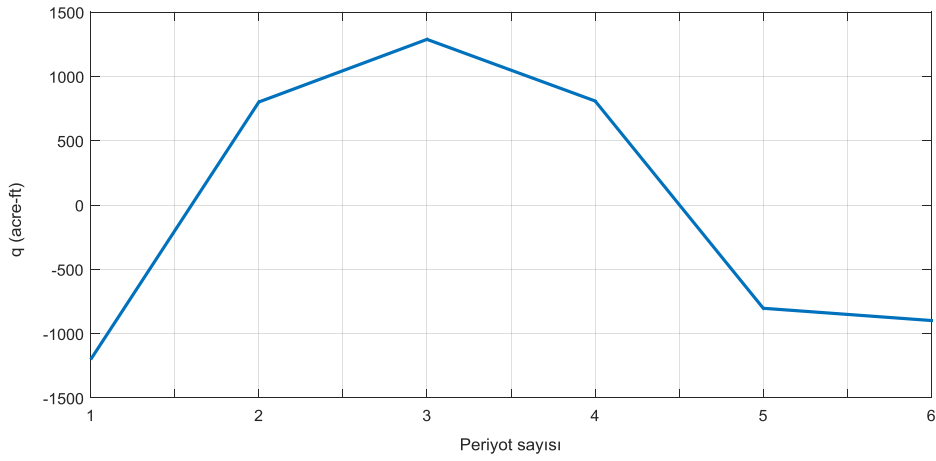


Şekil 11. PD hidrolik üretim biriminin üst rezervuarındaki su miktarının değişimi (PD birim devrede)

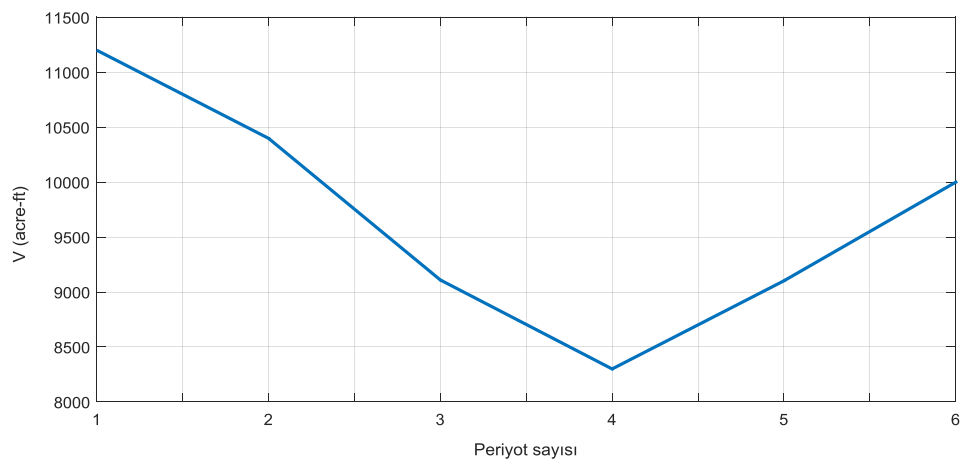
POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI



Şekil 12. Üretilen güçlerin periyotlara göre değişimi (PD birim devrede)



Şekil 13. PD hidrolik üretim birimi tarafından salınan-pompalanan su miktarları (PD birim devrede)

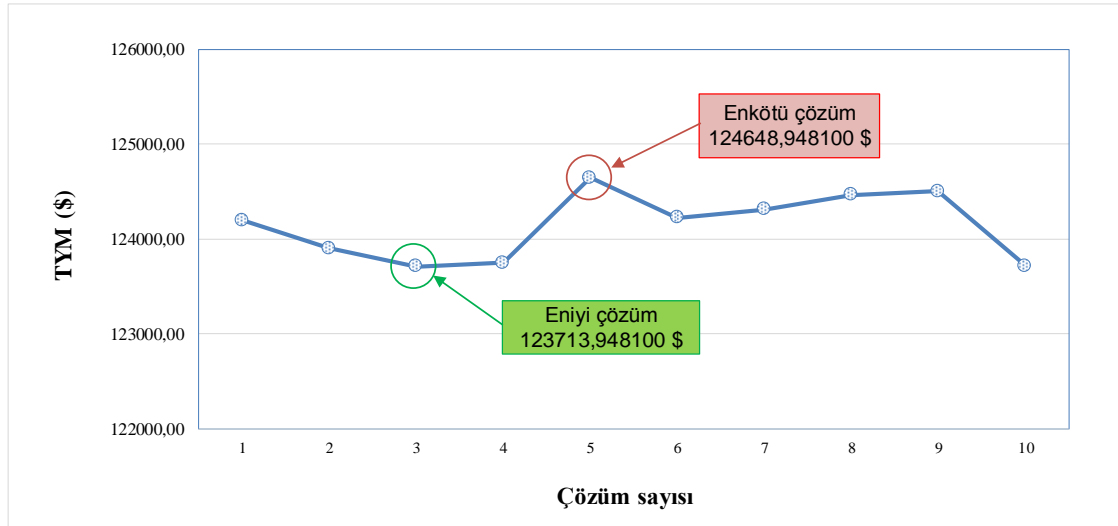


Şekil 14. PD hidrolik üretim biriminin üst rezervuarında kalan su miktarları (PD birim devrede)

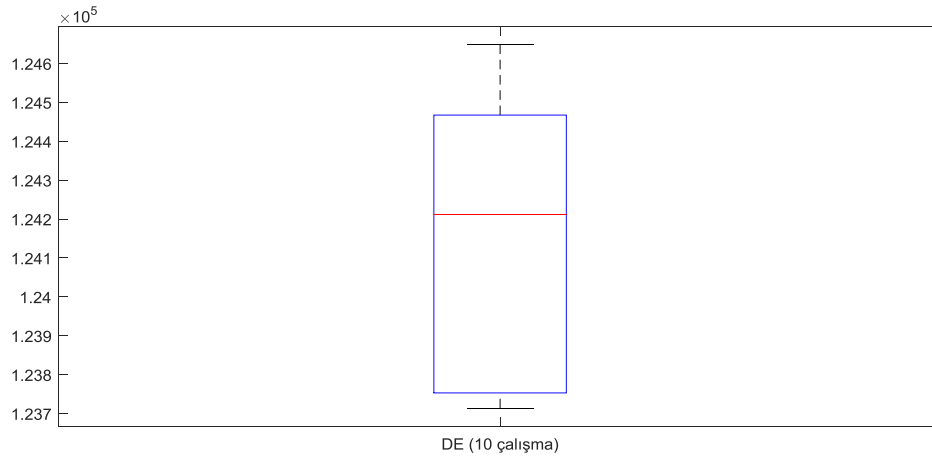
POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

En iyi çözüme ait Şekil 9'da yer alan *TYM* değerinin iterasyonlara göre değişimlerine bakıldığında, DE algoritmasının yaklaşık 450. iterasyonda eniyi *TYM* değerini yaklaşık olarak yakaladığı görülmüştür. Buna rağmen örnek sistemin iletim hatlarındaki güç kaybı değerindeki yakınsama devam etmektedir. Bunun nedeni amaç fonksiyonunda yer alan sağlanması gereken farklı kısıtlarında bulunmasıdır.

Bu durum için yapılan 10 çözümden elde edilen bütün *TYM*'lerin yer aldığı grafik Şekil 15'de ve bu çözümlere ait kutu grafiği Şekil 16'da verilmiştir. PD birime ait periyotlardaki üretim ya da pompalama güçleri ise Şekil 17'de verilmiştir.

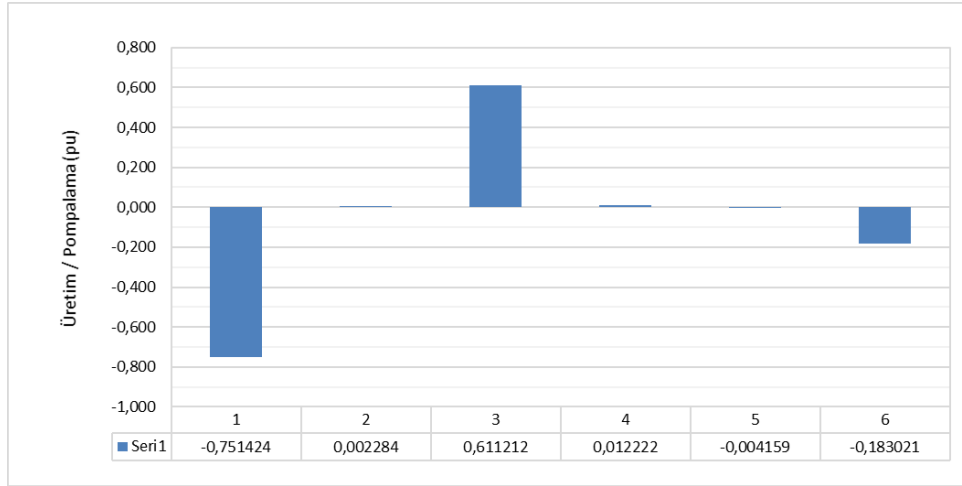


Şekil 15. 10 kez çalışmada elde edilen *TYM* değerleri (PD birim devre dışı)



Şekil 16. Kutu grafikleri (PD birim devrede)

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI



Şekil 17. PD hidrolik üretim birimi tarafından üretilen/harcanan güç değerleri (PD birim devrede)

5. SONUÇ

Çalışmada üretilen elektrik enerjisinin depolanması konusunda büyük bir avantaja sahip PD hidrolik üretim birimlerinin optimal güç dağıtımı problemi ele alınmıştır. Sadece termik yakıtlı üretim birimlerinin kendi başlarına ve bu birimlerle birlikte kullanılması ile sağlanan ekonomik fayda yaklaşık hesaplanmıştır. Çözüm yaklaşımında, bu birimler ile düşük yük talebinde, termik üretim birimleri tarafından fazladan üretilen enerji ile pompalama yapılarak üst rezervuarda su depolanmış, yüksek güç talebinde ise depolanan bu su ile üretim yapılarak sistemin devamlılığına katkıda bulunulmuştur.

PD hidrolik üretim birimleri bulunduran sistemlerde optimal güç dağıtımı problemi çalışmada iki farklı yaklaşımla ele alınmış ve DE algoritması ile çözülmüştür. İlk yaklaşımda PD hidrolik birim devre dışı bırakılmış, ikinci yaklaşımda ise devreye alınmıştır. Yapılan bu çözümlerde PD birim devre dışı iken toplam yakıt maliyeti değeri 124382,500879 \$, PD birim devreye alındığında ise toplam yakıt maliyeti değeri 123713,485620 \$ bulunmuştur. Dolayısıyla PD birim sisteme 669,0152 \$'lık fayda sağlamıştır.

Çalışmanın amacı karmaşık, doğrusal olmayan ve birçok kısıtı bulunan, elektrik mühendisliğinde büyük bir öneme sahip PD hidrolik üretim birimleri bulunduran sistemlerin optimal güç dağıtımı probleminin, sezgisel bir algoritma olan DE ile de çözülebilirliğini göstermektir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda sisteme PD hidrolik üretim birimleri ile birlikte farklı yenilenebilir enerji üretim sistemleri de entegre edilmesi ve farklı güç sistemi örnek çözümlerinin literatüre kazandırılması düşünülmektedir.

6. KAYNAKÇA

[1] Wood AJ., Wollenberg BF. Power Generation Operation and Control, John Wiley & Sons, New York, 1996.

[2] Özyön S. Optimal short-term operation of pumped-storage power plants with differential evolution algorithm, Energy, 1 March 2020; 194: 1-13.

[3] Urazel B. Uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient algoritmasının bazı elektrik enerji sistemi optimal işletim problemlerine uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.

POMPAYLA DOLDURMALI HİDROLİK ÜRETİM BİRİMİ BULUNDURAN SİSTEMLERDE OPTİMAL GÜÇ DAĞITIMI

[4] Fadıl S., Urazel B. Solution to security-constrained non-convex pumped-storage hydraulic unit scheduling problem by modified subgradient algorithm based on feasible values and pseudo water price, *Electr. Power Compon. Syst.* 2013; 41: 111-135.

[5] Fadıl S., Yaşar C. A pseudo spot price algorithm applied to the pumped-storage hydraulic unit scheduling problem, *Turk J. Elec. Eng.* 2000; 8(2): 93-109.

[6] Fadıl S., Urazel B. Solution to security constrained environmental/economic pumped-storage hydraulic unit scheduling problem by modified subgradient algorithm based on feasible values and pseudo water price, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2014; 60: 399-413.

[7] Fadıl S., Demir C., Urazel B. Solution to security constrained environmental pumped-storage hydraulic unit scheduling problem by genetic algorithm, *ISRN Power Eng.* 2013; 1-12.

[8] Chen PH. Pumped-storage scheduling using evolutionary particle swarm optimization, *IEEE Trans. Energy Convers.* 2008; 23(1): 294-301.

[9] Yaşar C. Puseydo spot elektrik fiyat algoritmasının optimal enerji system işletimi problemlerine uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1999.

[10] Storn R., Price K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *J. Global Optim.* 1997; 11: 341-359.

[11] Mandal D., Chatterjee A., Bhattacharjee AK. Design of fully digital controlled shaped beam synthesis using differential evolution algorithm. *Int. J. Antennas Propag.* 2013; 1-9.

AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU

Z. Özlem Parlak Biçer *, Savaş Bayram, Mahmut Sarı, Zafer Tarık Taner

* Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Talas, Kayseri

parlako@erciyes.edu.tr ; parlakoz@yahoo.com

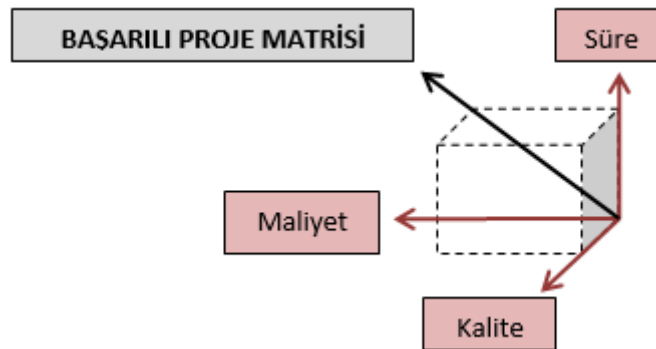
* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Belirlenen amaçlara ulaşmak için kısıtlı süre içerisinde para, hammadde, malzeme, makine gibi kaynakları ve üretim araçlarını bir araya getiren, onlar arasında uygun bir bileşim sağlayan süreç yönetim olarak tanımlanmaktadır (Gültekin, 2007). Yönetim, pek çok aşamadan geçerek günümüzdeki modern bilimsel anlayışına ulaşmış ve her zaman pratikte var olmuştur. Yapı üretiminde yönetim ise gelişen teknolojiyle doğru orantılı olarak disiplinlerin artması ve her mimari projenin kendine özgün olmasıyla önem kazanarak proje yönetimi kavramını oluşturmuştur.

Amerikan Yapım Yönetim Birliği (Construction Management Association of America-CMAA) proje yönetimini, “Bir yapımın başlangıcından sonuna kadar zaman, maliyet, kar ve kaliteyi denetlemek amacıyla, profesyonel yönetim metotlarını uygulayarak yürütülmesi” olarak tanımlamaktadır (<https://www.cmaanet.org/>). Proje Yönetim Enstitüsünün (Project Management Institute-PMI) tanımına göre ise “Bir projeye katılan birey veya organizasyonların, tüm bilgi, beceri, araç ve teknikleri uygulama süreci sonrasında projeden beklentilerini karşılamak veya aşmak” olarak tanımlanmaktadır (<https://www.pmi.org/>).

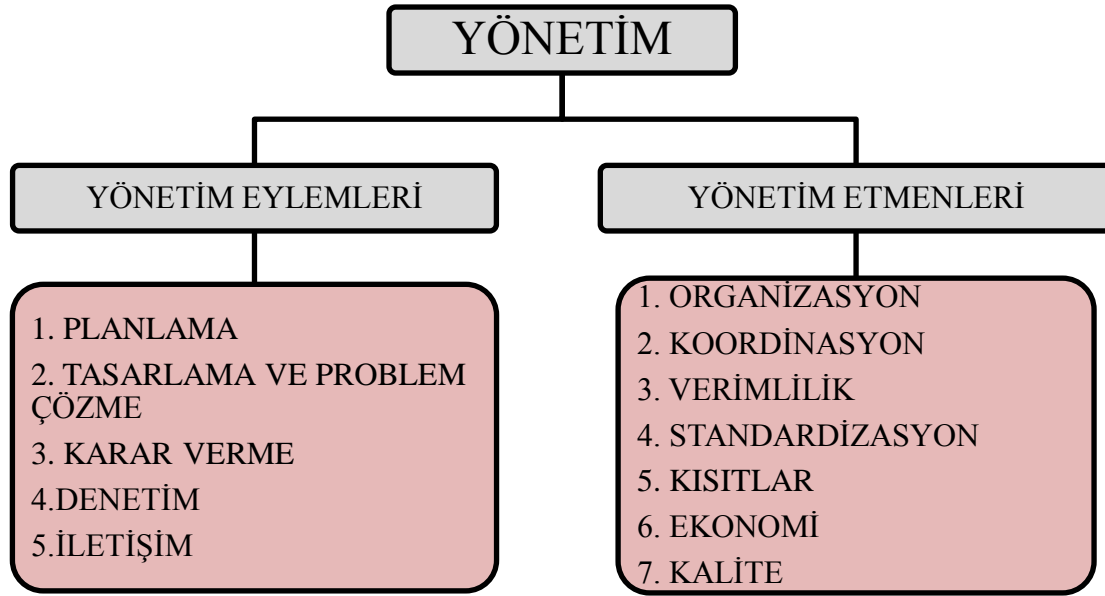
Benek ve Ulucan (2007), proje yönetimini; tasarıma ve yasal kısıtlamalara uygun yapım, sürdürülebilir ve sonuç odaklı çözüm üretimi ve proje disiplinini sağlayacak güçlü bir organizasyon olarak tanımlamışlardır. Kara (2001), proje yönetiminde temel amacın belirli sürede, belirli maliyetle ve istenilen kalitede projeyi tamamlamak olduğunu vurgulamıştır (Şekil 1).



Şekil 1: Proje yönetiminin temel amaçları

Proje yönetimi; her alanda yatırımcının yapmak istediği işin organizasyon ve yönetimini ifade etmektedir. Yönetim süreci yapım üretiminin tüm evrelerini kapsamakta ve öncelikle yatırımcının organizasyonunu düzenlemektedir. Bu organizasyon ile proje yönetim ekibi oluşmakta, ekibi yöneten proje yöneticisiyle ise hizmet anlayışı içinde proje yönetilmektedir (Sorguç, 2005).

Proje yönetiminde yer alan karmaşık ilişkiler ve zorunluluklar dâhilinde seçim yaparak proje yönetiminin süre, kalite ve maliyetler hedeflerine ulaşmasını proje yöneticisi sağlamaktadır. Bir yöneticinin süreç içerisinde yapması gereken beş ayrı eylem ve bu eylemler yapılırken dikkat edilmesi gereken, yönetimi etkileyen yedi ayrı etmen bulunmaktadır (Gültekin, 2007). Proje yönetim eylem ve etmenleri hem birbirleriyle, hem yapı ve bileşenleriyle, hem de yapı üretim ve kullanım süreçleri ile ilişkilidir (Şekil 2) (Gültekin, 2007). Bu nedenle yapı üretim sisteminin analizinde ve/veya sentezinde ilişkilerin değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2: Proje yönetim sürecinde eylemler ve etmenler (Gültekin (2007)'den uyarlanmıştır)

2. PROJE YÖNETİMİNDE ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYON ETMENLERİ

21. yüzyılda artan nüfus ve kentleşme ile ülkemizde yapı sektörü lokomotif sektörlerden biri haline gelmiştir. Artan yapı üretimi sosyal, ekonomik ve çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Günümüzde ulusal ve uluslararası standartlar ve organizasyon yöntemleri ile ürün ve/veya hizmetin maksimum verimlilikle üretimi sağlanmaya çalışılmaktadır. Çalışmanın bu kısmında proje yönetimindeki organizasyon ve standardizasyon etmenleri incelenmiştir.

2.1. Proje Yönetiminde Organizasyon Etmeni

Organizasyon, tüm canlıların yaşamsal faaliyetlerini sürdürürken bilinçli veya bilinçsiz bir şekilde içerisinde olduğu bir yapıdır. Belirlenen hedeflere ulaşmada yapılması gereken faaliyetleri gerçekleştirecek bir ekibe ihtiyaç duyulmaktadır. Bu faaliyetlerin koordinasyonunu sağlayan insan topluluğuna organizasyon adı verilmektedir (Kerzner, 2009). Proje Yönetimi Bilgi Birikimi Kılavuzu'nda ise "Organizasyonlar, belirli hedeflere ulaşmayı amaçlayan belirli kişi ve/veya departmanların sistematik bir şekilde düzenlenmiş hali" olarak tanımlanmaktadır. Barnard'a göre organizasyon, bilinçli olarak koordine edilmiş kişisel faaliyetler veya güçler sistemi olarak tanımlanmaktadır (Barnard, 1938). İnşaat projelerinde yönetimi ve koordinasyonu sağlayan insan topluluğu bu tanıma uymaktadır. İnşaat projeleri özgün, karmaşık ve büyüklük açısından değişen ölçeklere sahiptir. Proje kapsamının ve ölçeğinin büyümesi proje koordinasyonunun yönetilmesi güçlüğüne neden olmaktadır. Bu koordinasyonu sağlayan ekibe organizasyon denilmektedir. Belirli bir

hedefe yönelmek, koordine edilmiş faaliyet sistemlerinin tasarlanması, dış ortama entegre olunması ve sosyal varlık oluşturulması, organizasyonu diğer proje yönetim etmenlerinden ayıran temel özelliklerdendir (Daft, 2008).

Organizasyon toplumsal modernleşmenin önemli bir katkısı olarak görülebilir. Organizasyon söylemleri; şirketlerin davranışsal psikolojilerine, yönetim ve koordinasyon çalışmalarına doğrudan etki etmektedir. Böylece toplumun gelişmişliği ya da bulunduğu çağdaki çevresel etkilere gösterdiği tepkinin ölçüsünü meydana gelen organizasyon formlarıyla ortaya koymaktadır (Casey, 2002). Geniş anlamda organizasyon, kurum veya kuruluşun belirlediği temel hedeflere ulaşmada verimli ve etkili bir çalışma üretilmesini sağlayacak eylemlerin ortaya konması için kişiler arasında görev dağılımının yapıldığı ve ekip olarak nasıl çalışılması gerektiğinin ortaya koyulduğu yapısal bir sistemdir (Akdoğan, 1994). Projelerin hangi yöntemle ve nasıl yönetileceği sorularının cevabı proje yöneticileri tarafından uygulanan organizasyon yapısında gizlidir. Her proje kendine özgü yapısıyla diğerlerinden farklıdır. Bu farklılığın kontrol edilmesi, hızlı ve istenilen sonuçlara ulaşılması doğru bir organizasyon formu ile mümkün olabilir.

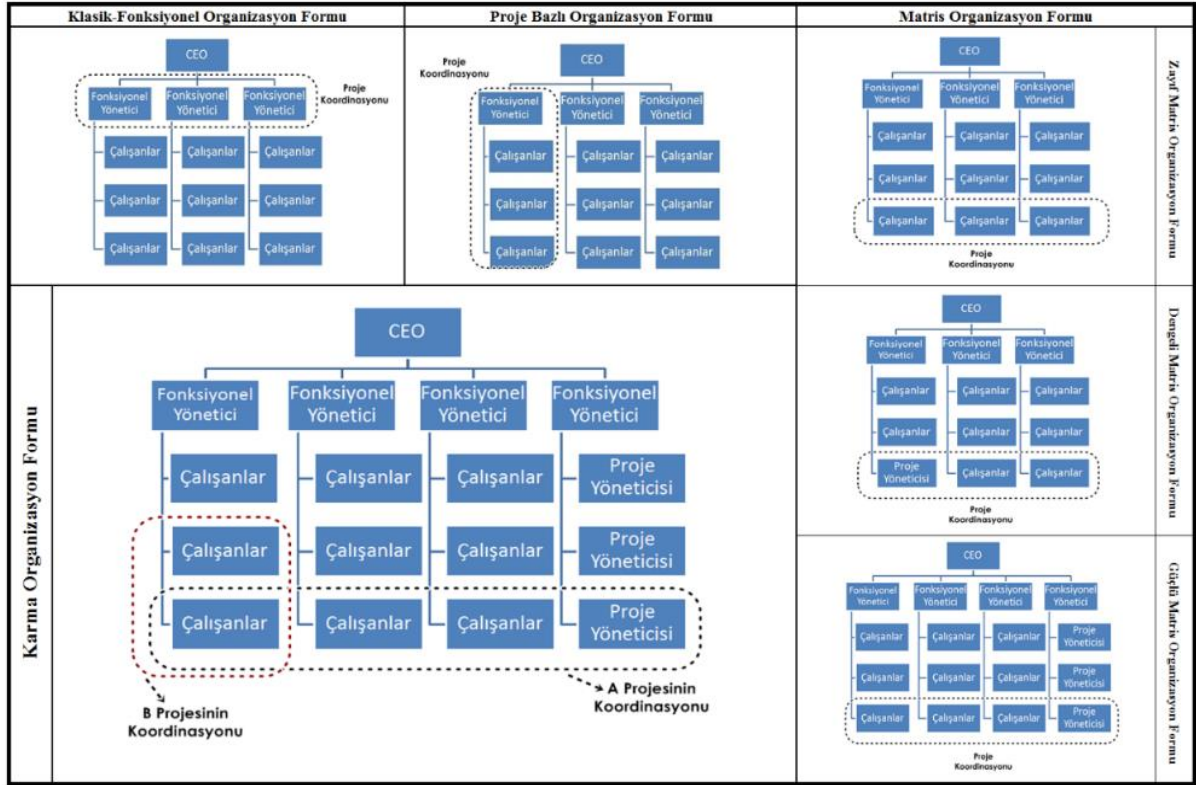
2.1.1. Proje Yönetiminde Organizasyon Etmeninin Çeşitleri

Tercih edilecek organizasyon formu proje sayısına, niteliğine, kapasitesine, içerdiği farklı disiplin sayısına ve disiplinler arası iletişimin özelliği gibi etmenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Organizasyon formu, proje süresince ihtiyaç ve taleplere bağlı olarak sık sık değişen dinamik bir sistemdir. Proje yönetiminde kullanılan dört organizasyon formu vardır (Şekil 3) (Ekici, 2006). Bunlar şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- a. **Klasik-Fonksiyonel Organizasyon Formu:** Rutin ve küçük projelerde kullanılmaktadır. Her birim çalışanı kendi yöneticisine karşı sorumludur. Son karar makamı üst yöneticidir. Her bölüm bağımsızdır ve diğer bölümlere karşı sorumluluğu yoktur (Erik, 1998).
- b. **Proje Bazlı Organizasyon Formu:** Süreç yönetiminin yapıldığı bir sistemdir. Yöneticiler daha çok idari denetimi sağlamaktadırlar. Kaynaklar en üst düzeyde proje kapsamında kullanılır ve çalışma ekibinin konuları birbirine yakındır. Dikkat çeken husus, proje yöneticilerinin geniş yetki ve bağımsızlığa sahip olmalarıdır (Kerzner, 2009).
- c. **Matris Organizasyon Formu:** Girdilerin ve çıktılarının çok fazla sayıda olduğu, eş zamanda birçok projenin gerçekleştiği karmaşık projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hiyerarşi hem düşey hem yatay olarak çalışmaktadır. Proje yöneticilerinin yetki ve sorumluluk düzeylerine göre zayıf, dengeli ve güçlü matris organizasyon formları mevcuttur (Hendricksen ve Au, 1989).
- d. **Karma Organizasyon Formu:** Farklı organizasyon formlarının bir arada kullanıldığı organizasyonlardır. Örneğin güçlü matris ile yönetilen bir projede küçük bir projenin gerçekleştirilmesi için bir ekibin klasik-fonksiyonel organizasyon formu ile çalışmasına müsaade edilebilmektedir (PMI, 2013).

Belirtilen organizasyon formları her projede öncelenen kriterlere göre proje yöneticisi tarafından seçilmektedir. Klasik-fonksiyonel, proje bazlı ve matris organizasyon formları temel organizasyon formlarıdır. Bu seçimde temel organizasyon formlarının sağladığı avantajlar ve dezavantajlar belirleyici olmaktadır. Temel organizasyon formları proje özelliklerine göre bir arada kullanılarak karma organizasyon formu oluşturulabilmektedir. Böylece karma organizasyon formu içerisinde barındırdığı her bir temel organizasyon formunun özelliklerini ayrı ayrı barındırmaktadır (Tablo 1).

AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU



Şekil 3: Organizasyon formları (PMI, 2013)

Tablo 5: Organizasyon formlarının avantaj ve dezavantajları (Kerzner, 2009)

Org.	No	Avantajları	Dezavantajları
Klasik-Fonksiyonel Organizasyon	1	Kolay Bütçe Kontrolü	Müşteri Odaklı Çalışma Mantığının Olmaması
	2	İnsan Kaynaklarının Esnek Kullanımı	Müşteri Taleplerine Yanıt Süresinin Uzun Olması
	3	İnsan Kaynağının Farklı Projelerde Değerlendirilebilmesi	Sorumluluğun Tespitinde Yaşanan Zorluklar
	4	İletişimin Aşağıdan Yukarı ve Etkili Kullanımı	Genel Proje Hedefinin Tüm Ekip Tarafından Benimsenmesinde Yaşanan Zorluklar
	5	Yöneticilerin Önceliklerine Bağlı Olarak Reaksiyoner Çalışma Yeteneği	Yeniliklere ve Değişimlere Açık Olmaması
	6	Raporlamadaki Bürokrasisinin Azlığı	Farklı Birimlerde Yaşanacak Koordinasyon Sıkıntılarında Genel Koordinasyonun Sağlanmasında Yaşanan Zorluklar
Proje Bazlı Organizasyon	1	Proje Yöneticisinin Sahip Olduğu Yetki Genişliği	Çok Fazla Üretimin Aşamasında Personelin Verimsiz Kullanımı
	2	Güçlü İletişim İmkânı	Yöneticilerin Denetimi İçin Üst Düzey Koordinasyonun Gerekliliği
	3	Reaksiyoner Yönetim Yapısı	İnovatif Çalışmaların Proje Gelişimine Kıyasla Önemsiz Olması
	4	Proje Hedeflerine Sadakat	Personelin Gelişimi Açısından Fırsat Eksikliği.
	5	Süre, Maliyet ve Kalitede Esneklik	
	6	Karar Verme Mekanizmasının Hızlı Olması	
Matris Organizasyon	1	Proje Yöneticisinin Tüm Kaynaklar Üzerindeki Geniş Kontrol Yetkisi	Çok Boyutlu İş Akışı
	2	Genel Şirket Politikalarına ve Prosedürlerine Aykırı Olmamak Kaydıyla Bağımsız Proje Çalışması Yapma İmkânı	Çok Boyutlu Bilgi Akışı
	3	İhtilaf, İhtiyaç ve Değişiklikler Konusunda Hızlı Reaksiyon Alma Kabiliyeti	İzleme ve Kontrolde Yaşanan Zorluk
	4	Yetki ve Sorumluluğun Doğru Paylaşımı	Değişen Öncelikler
	5	Süre, Maliyet ve Kalitede Optimum Noktanın Yakalanma İmkânı	Politika ve Prosedürlerin Tanımlanmasında Yaşanan Süre Kaybı ve Zorluklar
	6	Anahtar Konumundaki Personelin Farklı Birimlerde Paylaşılma İmkânı	Personelin Birden Fazla Raporlama Sürecine Sahip Olması Nedeniyle Bürokratik Sürecin Oluşu

2.1.2. Yapı Sektöründe Organizasyon

Yapı sektöründe işveren ve yüklenici arasındaki sözleşme şartlarına bağlı olarak gelişen organizasyonun kurulmasında iki temel yaklaşım mevcuttur. Birincisi, geleneksel organizasyon yapısı ile farklı işlevleri gerçekleştiren organizasyon formlarının ayrılmasıdır. İkincisi ise ortak girişim, tasarım ve uygulamanın aynı anda yapıldığı işlerde kullanılan organizasyon formlarının entegrasyonudur (Hendricksen ve Au, 1989). Geçmişte, proje yönetiminde organizasyon, proje içerisinde ağ oluşturulmasına dayanmaktaydı. Belirlenen hedefin niteliği, koordinasyonun sağlanacağı insan sayısı, içinde bulunulan çevresel şartlar ve dış etkiler gibi faktörler, organizasyon formlarının geliştirilmesinin önünü açmıştır. Bu durum uygun organizasyon formunun tasarlanmasını ve seçimini zorlaştırmıştır (Cheng vd., 2003). Bu nedenle organizasyon formu seçiminde etkili olan faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Projenin büyüklüğü, süresi ve konumu, proje yönetiminin organizasyon tecrübesi, üst yönetimin felsefesi, elde bulunan kaynaklar ve projenin benzersiz yönleri projeye uygun organizasyon formu seçiminde etkili olan faktörlerdir (Kerzner, 2009).

Doymuş piyasa koşullarında artan rekabet şartları ve maliyetler, öngörülemeyen tüketici talepleri ve gelişen teknoloji nedeniyle ortaya çıkan yeni üretim tekniklerini takip edebilecek mali bütçelerin olmayışı organizasyon formu seçiminde etkili olan çevresel etkiler arasında sayılmaktadır (Wallace, 1963). Çok uluslu projelerin koordinasyonunda ve organizasyonunun kurulmasında iletişim kanallarının aktif olması ve proje kültürüne uygun organizasyon formunun seçilmesi gerekmektedir (Cheng vd., 2003). Uluslararası projelerde farklı kültür ve etnik kimlik sahibi paydaşlar ile çalışma ortamı bulunmaktadır. Farklı kültürlerden insanları organizasyon içerisinde doğru konumlandırmak, proje hedefine odaklamak ve iletişimin aktif hale gelmesini sağlamak gerekmektedir. Başarılı bir proje yöneticisinin, çok kültürlü organizasyonel yetkinliğe sahip olması gerekmektedir (PMI, 2013). Morfolojisi binası yapım işine ait ihale dosyasında bulunan kanun ve yönetmelikler metodoloji, yapım yönetimi ve organizasyon formu kapsamında incelenmiştir.

2.2. Proje Yönetiminde Standardizasyon Etmeni

Proje yönetim etmenlerinden birisi olan standart; insan hayatının her alanında yer alan ve yaşam kalitesini etkileyen önemli bir kavramdır. Gelişen dünya ticareti ve nüfusuna paralel olarak, gittikçe karmaşık bir hal alan problemlere çözüm bulabilmek için ekonomik, verimli ve kullanışlı çözüm yolları bulma adına uygulanan standartlar gün geçtikçe önem kazanarak, uluslararası bir niteliğe kavuşmuştur (Çınar, 1984). 20. yüzyılın ilk yarısında uluslararası standardizasyon örgütleri kurulmaya başlamıştır. Bu doğrultuda Şubat 1947'de Uluslararası Standardizasyon Birliği (International Organization for Standardization-ISO) kurulmuştur. İlerleyen yıllarda teknoloji ve üretimin neredeyse tüm yönlerini kapsayan 22.910'dan fazla uluslararası standart yayınlanmıştır (ISO, 2019). ISO'nun tanımına göre standardizasyon; *“Belirli bir faaliyetle ilgili olarak ekonomik fayda sağlamak üzere bütün ilgili tarafların yardım ve işbirliği ile belirli kurallar koyma ve bu kuralları uygulama işlemidir”* (ISO, 2019).

Ülkemizde ise bütün tarım, sanayi alanlarında elde edilen ürünün üretim ve imalatın sürecinde gerekli şekil ve kalite düzeylerinin belirlenmesi ve ürünlerin ihraç edilebilmesi için Türkiye’de Ticaret Odaları, Sanayi Odaları ve Ticaret Borsaları Birliğine bağlı olarak Ekim 1954 tarihinde Türk Standartları Enstitüsü (TSE) kurulmuştur. TSE, Kasım 1960 tarihinde yayımlanan 132 sayılı Türk Standartları Enstitüsü Kuruluş Kanunu ile bugünkü yapısına kavuşmuştur (Yurtoğlu, 2018; MCBÜ, 2019). Ülkemizin rekabet gücünü artırmak, ulusal ve uluslararası düzeyde ticaretini kolaylaştırmak ve toplumun yaşam kalitesini yükseltmek amacıyla TSE tarafsız, bağımsız, etkin ve güvenilir bir şekilde faaliyetlerini gerçekleştirmektedir (TSE, 2019). TSE, *“Mevcut ve potansiyel problemler dikkate alınarak, belirli bir konuda ortak ve tekrar eden kullanımlar için en uygun seviyede düzenin elde edilmesi amacıyla gerekli hükümlerin oluşturulması faaliyeti”* olarak tanımlanmaktadır (TSE, 2019).

Standart kavramından türemiş olan standardizasyon kavramında da birçok farklı tanım yer almaktadır. Lillrank (2003), standardizasyonu; bir sürecin performansını artırmak için yapılabilecek bir eylem olarak tanımlanmıştır (Lillrank, 2003). Ertuğ’a (2015) göre standardizasyon; ürün kalitesinin

alt sınırı tespit ederek belirlenen düzeyin altında üretimine müsaade etmeyen, kalite güvenilirliğini sağlayan endüstriyel kavramdır (Ertuğ, 2015). Avşar (2003)'a göre standardizasyon; belirli bir ihtiyacı tam anlamıyla karşılayacak nitelikte olan ürün veya hizmetlerin üretiminde kaynak kayıplarını asgariye indirmek için yapılan eylemler bütünüdür (Avşar, 2003). Endüstrileşme kapsamında standardizasyon; üretimde performans, verimlilik, kontrol, kalite kavramlarının artmasına, diğer yandan maliyet ve risklerin azalmasına olanak sunmaktadır (Tosun, 2019). Standardizasyon istihdamın ve işgücü verimliliğinin artırılması ve enformasyonun sağlanması gibi sosyo-ekonomik faydalar sunduğu gibi ürün maliyetlerinin azaltılması, rekabetin ve pazar payının artırılması gibi doğrudan ekonomik faydalar da sağlamaktadır (Vries, 2006). Alan, standardizasyonun faydalarını ekonomik ve sosyo-ekonomik olmak üzere ikiye ayırmıştır (Alan, 2013) (Tablo 2).

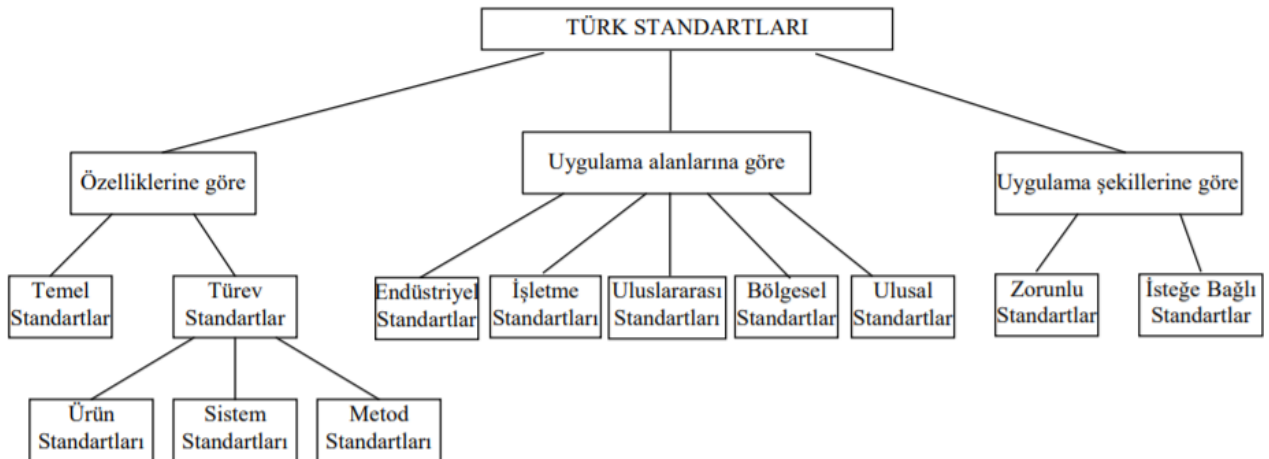
Tablo 6: Standardizasyonun faydaları (Alan (2013)'den uyarlanmıştır)

Ekonomik Faydalar	Sosyo-Ekonomik Faydalar
1. Ticaretin Artması ve Teknik Engellerin Azaltılması	1. Enformasyonun Sağlanması, Araştırma ve İnovasyonun Artırılması
2. Pazara Girme, Pazarın Gelişmesine Yardımcı Olma ve Pazar Payının Artırılması	2. Ulusal ve Uluslararası Uyumun Sağlanması ve Farklılıkların Azaltılması
3. Maliyet Tasarrufu	3. İstihdamın Artırılması
4. Zaman Avantajı	4. Stratejik Ortaklıklar ve İşbirlikleri Oluşturulması
5. Beklenmeyen Durumların Önlenmesi	5. Kalite, Çevre ve Güvenlik

Gültekin (2007), standardizasyonun ana faydasının kaynak verimliliğini olduğunu vurgulayarak, faydalarını üretici ve tüketici açısından iki başlıkta incelemiştir. Maliyetlerin azalması, ürüne olan güvenin artması, ürünlerin değerlendirilmesinin kolaylaştırılması, firenin azalması ve zamandan tasarruf yapılması, standardizasyonun üreticiye sağladığı faydalardır. Ürün sipariş ve alım-satım işlemlerinde kolaylık sağlama, ürün karşılaştırılmasına olanak tanınması, mal ve can güvenliğini sağlama, kalite-değer ilişkisinin kurulması ise standardizasyonun tüketiciye sağladığı faydalardır (Gültekin, 2007).

2.2.1. Proje Yönetiminde Standardizasyon Etmeninin Çeşitleri

TSE'ye göre temel standartlar; özelliklerine, uygulama alanlarına ve uygulama şekillerine göre üç farklı sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 4). Özelliklerine göre ikiye ayrılan standartlardan temel standartlar; ticari ilişkilerde karşılaştırmaya, değer ölçmeye ve anlaşma sağlamaya yarayan kapsamlı standartlar olup, temel standartlar esas alınarak oluşturulan standartlara ise türev standartlar adı verilmektedir (MCBÜ, 2019).



Şekil 4: Standardizasyon çeşitleri (MCBÜ, 2019)

Standardizasyon uygulamalarında temel doküman, standartlardır. Standartların en önemli özelliği, gelişen endüstri ile teknolojiye uyum sağlayabilme kabiliyetine sahip olmalarıdır. Bu doğrultuda uygulama neticesinde ortaya çıkan sorunlar, kaynak dokümanlarında olabilecek revizyonlar ve teknolojik gelişmeler karşısında standartların güncelleştirilerek şartlara uygun hale getirilmesi gerekmektedir (Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı-BSTB, 2017).

21. yüzyılda birbiriyle yakın ilişki içerisinde olan nüfus artışı ve kentleşme hem dünyada hem de ülkemizde inşaat sektörünü yakından ilgilendiren iki önemli unsur haline gelmiştir. Artan kentsel nüfus, insanların başta yaşamsal faaliyetleri olmak üzere; sosyal, kültürel, eğitim, sağlık vb. ihtiyaçları için yapılaşmanın daha da artacağı düşünülmektedir. Bu noktada dikkat çeken bir diğer önemli konu ise artan yapı üretimi ile çevre sorunlarının artmış olması, bunun yanında doğal kaynak, enerji ve hammadde kıstıtlılığının oluşturduğu tehditlerin küresel boyuta ulaşmasıdır. Bu doğrultuda yapılaşmayı kapsayan standartların önemi gün geçtikçe artmaktadır.

2.2.2. Yapı Sektöründe Standardizasyon

Artan yapı üretimi; sosyal, ekonomik ve çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Ülkemizde TSE standartları dışında çevrenin sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunmasını sağlamaya yönelik yönetmelik ve yasal mevzuatlar da bulunmaktadır. 1983 yılında yayımlanan 2872 sayılı Çevre Kanunu; bütün canlıların ortak varlığı olan çevrenin, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunmasını amaçlayan ülkesel ölçekteki ilk kanundur (Çevre Kanunu, 1983). İlerleyen yıllarda ülkesel ölçekte yapı sektöründe yapımın ve yapı malzemelerinin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik boyutlarına uygun, enerji etkin ve geri dönüştürülebilir olmasını ele alan mevzuatlar yayımlanmıştır. Bu mevzuatların yapım boyutları ile ilişkileri Tablo 3’de tanımlanmıştır (Taner, 2019). Morfolojisi binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenlemesi yapım işi yasal mevzuatlarda yer alan metodoloji, yapım ve yapı malzemeleri standartları kapsamında incelenmiştir (Tablo 3).

Tablo 7: Yapımla ilgili Türkiye Cumhuriyeti mevzuatları ve ilişkileri (Taner (2019) tarafından ISO’nun oluşturduğu tablodan yola çıkarılarak uyarlanmıştır)

	Çevresel Faktörler	Ekonomik Faktörler	Sosyal Faktörler
Metodoloji	Çevre Kanunu		
Yapım	Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği		
	Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği		
	Enerji Verimliliği Kanunu		
	Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği		
	Enerji Kimlik Belgesi (EKB)		
	Binalar İle Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği		
Yapı Malzemesi	Yapı Malzemeleri Yönetmeliği		

3. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM

Yapı üretiminde proje yönetiminin önemi ile proje yönetimi etmenleri kapsamında bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde elde edilen veriler doğrultusunda incelenerek Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve çalışma yöntemi tanımlanmıştır.

3.1. Çalışma Yöntemi

K.A.E.Ü Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığına iletilen 27.11.2019 tarihli ve 28856550-622.03/00000204601 sayılı dilekçe ile “Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, Altyapı ve Çevre Düzenleme Yapım İşİ”ne ait dokümanlar elde edilerek, alan çalışması yapılacağına dair ilgili kuruma bilgi verilip, onay alınmıştır. Morfoloji binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işinin 2019-2020 öğretim yılı güz dönemi içerisinde yapım sürecinin tamamlanması planlanmaktadır. Sonrasında yapı, Ahi Evran Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı tarafından teslim alınacak ve kullanıma açılacaktır. Araştırmada öncelikle yapı sektöründe organizasyon ve standardizasyon yönünde bir literatür taraması yapılmıştır. Bu tarama ile elde edilen bulgular doğrultusunda morfoloji binası incelenmiştir.

Yapım işlerinde sözleşme; ekindeki ihale dokümanı ve diğer belgelerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Sözleşme, ekleri ile bir bütün olmalıdır. Bu doğrultuda Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, Altyapı ve Çevre Düzenleme Yapım İşinin ihale dokümanını oluşturan belgeler bulunmaktadır. Bu belgeler üzerinden ve yerinde incelemeler yapılarak, çalışma tamamlanmıştır. İhale dokümanı;

- Yapım İşleri Genel Şartnamesi*,
- İdari Şartname*,
- Sözleşme Tasarısı*,
- Uygulama Projesi,
- Mahal Listesi,
- Özel Teknik Şartname*,
- Genel Teknik Şartname*,
- Diğer Ekler,

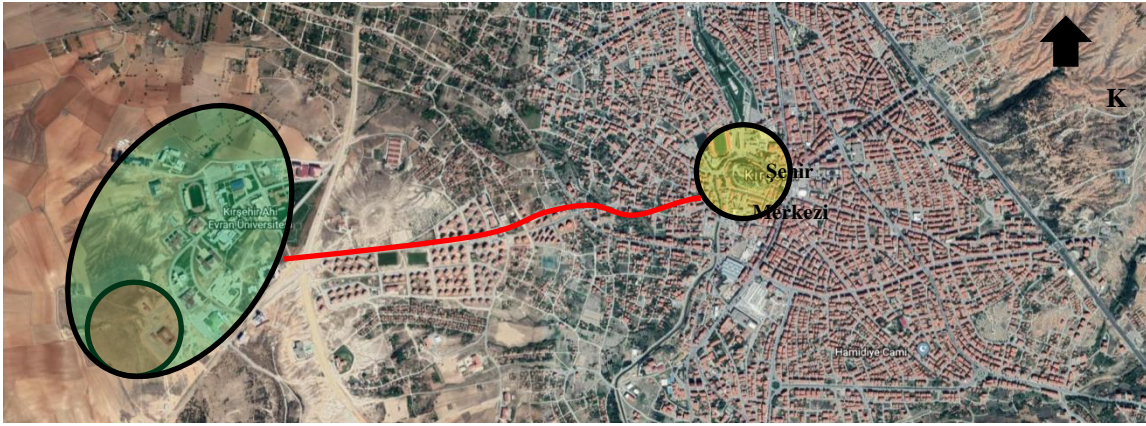
Olmak üzere sekiz alt dokümandan oluşmaktadır.

Elde edilen veriler doğrultusunda yapım sürecini tanımlayan ihale dokümanları arasından; yapım işleri genel şartnamesi, idari şartname, sözleşme tasarısı, inşaat işleri genel şartnamesi ve inşaat işleri özel teknik şartnamesi olmak üzere beş alt doküman (*), organizasyon ve standardizasyon etmenleri kapsamında incelenmiştir. İnceleme sonrasında elde edilen veriler, grafikler ve tablolar yardımı ile görselleştirilmiştir.

3.2. Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası

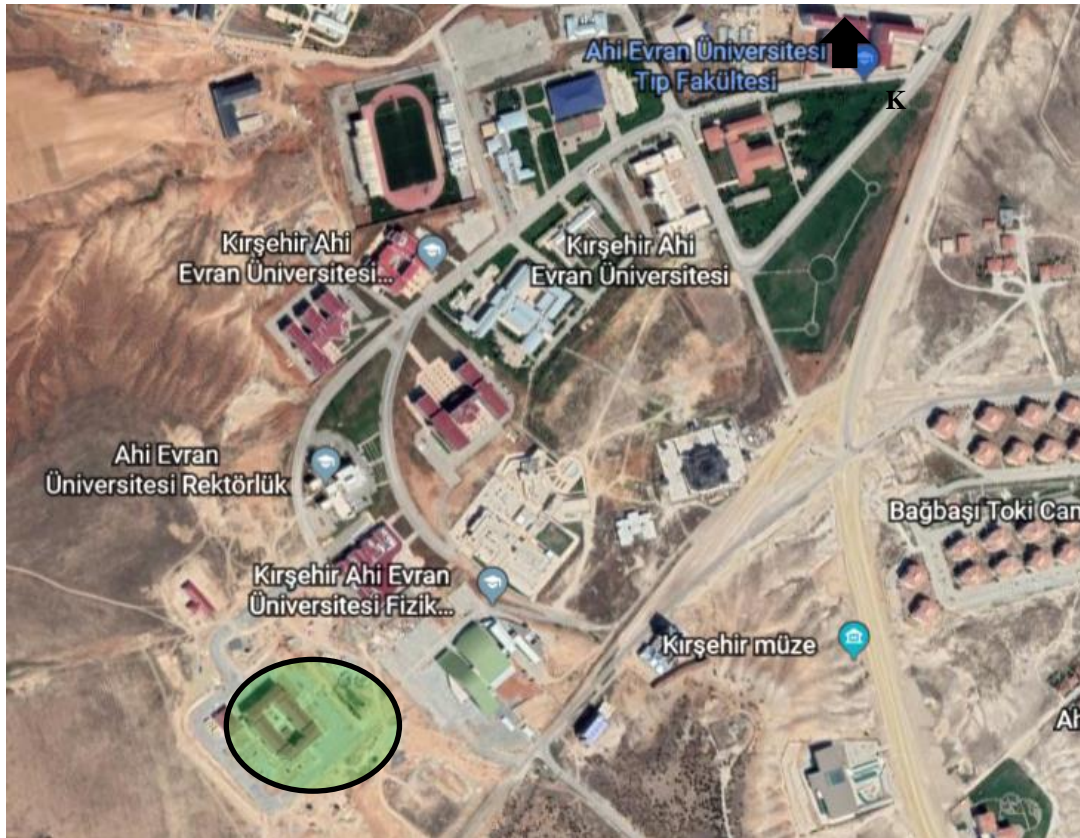
Kırşehir; kışları soğuk ve kar yağışlı, yazları sıcak ve kurak hava şartlarına sahip olan ve İç Anadolu Bölgesinin tipik iklimi olan karasal iklim etkisi altında bulunan bir şehirdir. Kırşehir şehir merkezinden gelen Şehit Sahir Kurutoğlu Caddesinin üçüncü kilometresinde Ahi Evran Üniversitesi Bağbaşı Yerleşkesi bulunmaktadır. İncelenen Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, yerleşkenin güneydoğusunda yer almaktadır. İnceleme alanı şehrin batısında yer alan hâkim rüzgârların etkisi altındadır. Kampüs içerisinde yer alan yapılar arasındaki mesafelerin fazla olması ve incelenen binanın doğusunda yapılaşma bulunmadığı için rüzgâr ve soğuk hava etkisi kent içine göre daha fazla olmaktadır (Harita 1).

AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU



Harita 1: A.E.Ü. Tıp Fakültesi morfoloji binasının konumu (Google Earth, 2019)

Yapının güneydoğusunda Ahi Evran Üniversitesi Rektörlük Binası, Kongre ve Kültür Merkezi Binası, Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Yüksekokulu Binası yer almaktadır (Harita 2). Tıp Fakültesi Morfoloji Binasının yapım sürecine ait yönetim, organizasyon ve standardizasyon etmenleri incelenmiştir.



Harita 2: A.E.Ü. Tıp Fakültesi morfoloji binasının konumu (Google Earth, 2019)

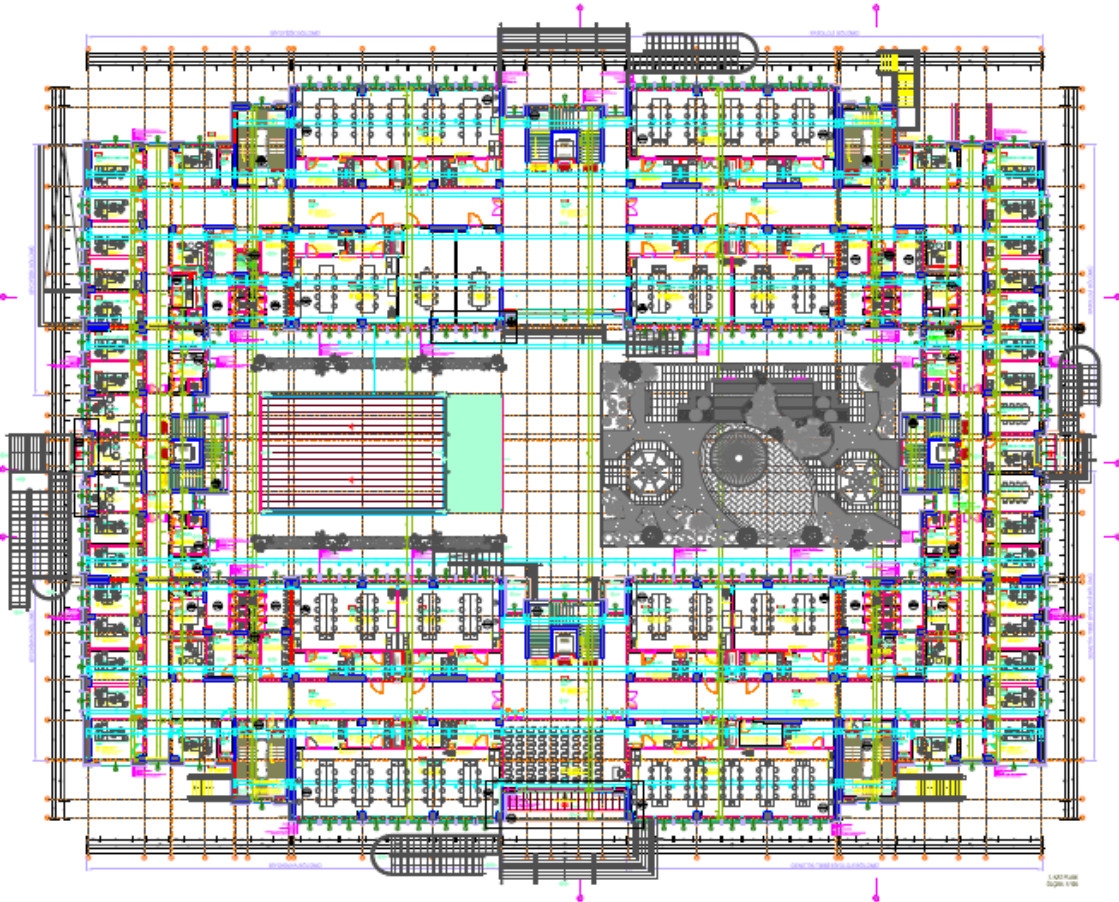
Tıp Fakültesi Morfoloji Binası (Şekil 5-6); bodrum kat, zemin kat ve üç normal kat (B+Z+3NK) olmak üzere toplam beş kattan oluşmaktadır. Avlulu plan tipine sahip olan bina kuzeydoğu-güneybatı yönünde tasarlanmıştır. Böylelikle bina içerisinde yer alan işlevlerin doğal ışık alması sağlanmıştır. Aynı zamanda Kirsehir'in geleneksel mimarisinde kullanılan taş yapı malzemesinden yola çıkılarak binanın cephesi tasarlanmıştır. Bina, 5.044,18 m² oturma alanına, 17.338,25 m² kapalı alana, 4.840,00 m² yeşil alana ve 201 araçlık açık otoparka sahiptir (Şekil 5).

AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU

Binanın ana girişi kuzeybatıdan sağlanmaktadır. Bina; amfiler, laboratuvarlar, derslikler, akademisyen odaları, çalışma odaları, ıslak hacimler ve teknik hacimlerden oluşmaktadır (Şekil 6) (<https://www.ahievran.edu.tr/>).



Şekil 5: A.E.Ü. Tıp Fakültesi morfoloji binası genel görünümü (ERT Proje, 2019)



Şekil 6: A.E.Ü. Tıp Fakültesi morfoloji binası kat planı

4. BULGULAR

Çalışmanın bu bölümünde literatür çalışması ile elde edilen kavramsal verilerin Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işinde kullanılma durumu incelenmiştir. Elde edilen veriler şekiller ve tablolar yardımı ile görselleştirilmiştir.

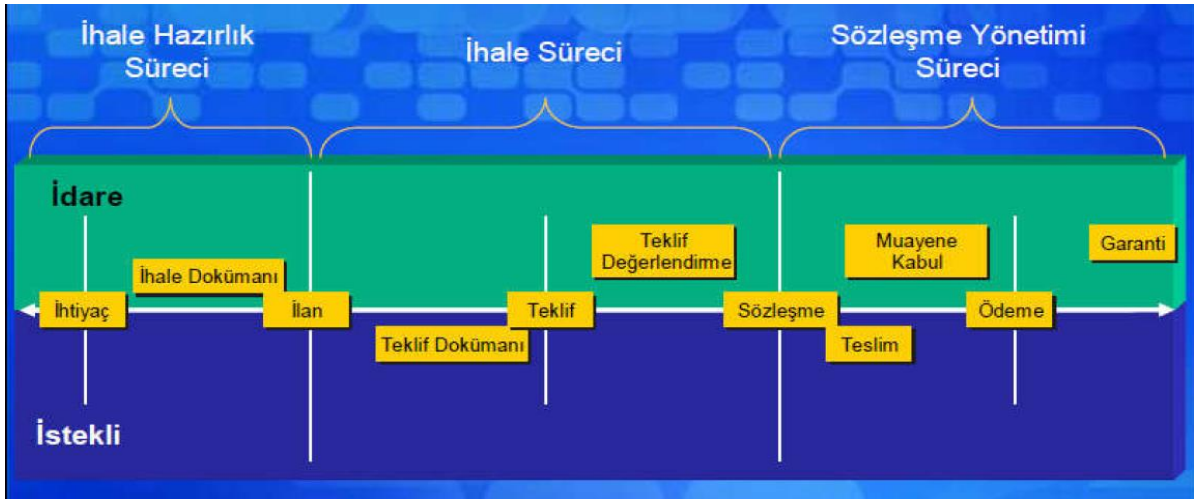
4.1. Organizasyon Etmeni ile İlgili Bulgular İnşaat sektöründe proje yönetim süreci, birçok ekonomik ve çevresel etki altında gelişen dinamik bir süreçtir. Sürekli değişen ve gelişen şartlara adaptasyon sağlanması oranı ile yönetimin başarı oranı arasında şüphesiz doğrusal bir ilişki söz konusudur. Adaptasyonun sağlanması doğru bir organizasyon formu ile mümkün olmaktadır. Organizasyon formu başarıyı etkileyen önemli bir faktördür. Bu bağlamda Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işinde kullanılan organizasyon formlarının proje yönetim sürecine olan etkileri incelenmiştir.

Kırşehir morfoloji binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenlenmesine konu olan açık ihale usulü (4734/madde 19) ile ihale edilen işlerin işveren konumunda Ahi Evran Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı ve yüklenici konumunda ise Acerler İnşaat bulunmaktadır. Yapım işi, yüklenici tarafından teklif edilen 26.252.400,00 TL sözleşme bedeline sahip ve anahtar teslimi götürü bedel bir sözleşme türüne sahiptir. Yüklenici idareye 1.600.000,00 TL (sözleşme bedelinin %6'sı) tutarında kesin teminat ödemiştir. 105 günlük çalışmaya uygun olmayan sürenin olduğu yapım işinde, toplam 800 takvim gününü kapsayan proje süresi tayin edilmiştir.

Yüklenicinin organizasyon formunu direkt etkileyecek olan alt yüklenici seçimi konusunda, sözleşmede, yüklenicinin idarenin onayı olmaksızın alt yüklenici çalıştıramayacağı ve işin tamamını alt yükleniciye yaptıramayacağı belirtilmiştir. Alt yüklenicinin varlığı yüklenicinin işteki mesuliyetini kaldırmamaktadır. Yüklenicinin ve alt yüklenicinin sorumluluğu maddesinde Yapım İşleri Genel Şartnamesinin 21. maddesine yapılan atıfla idare, işin taahhüt edildiği düzeyde yapılmaması halinde alt yüklenicinin değiştirilmesine ve işin yüklenici tarafından yapılmasına karar verebilmektedir. Bu açıdan idarenin, yüklenicinin organizasyon formunun tayininde etkili olduğu görülmektedir.

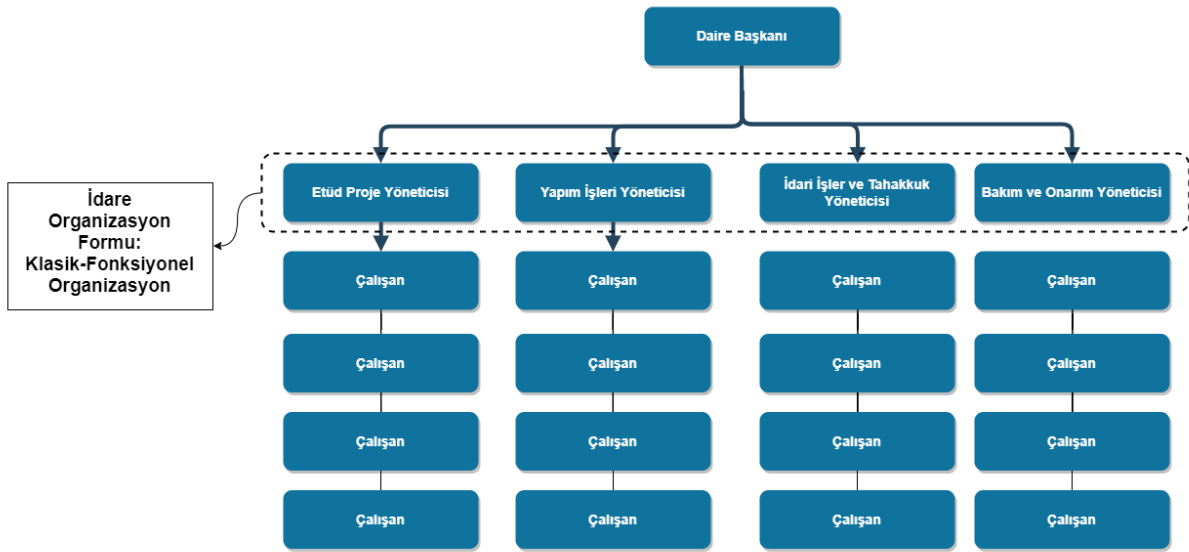
Yüklenicinin organizasyon formunda bulundurması gereken asgari teknik personelin sayısı ve niteliği sözleşmede belirtilmiştir. Proje sürecinde uygulamada yönetici konumundaki inşaat mühendisinin benzer işte en az 5 yıl, saha mühendisleri ve teknikerlerinin benzer işte en az 2 yıl tecrübeye sahip olmaları gerektiği belirtilmiştir. Belirtilen teknik personelin proje süresince uygulama alanında bulunması ve bulunmadığı takdirde hakedişten düşülmek kaydıyla cezai işlem uygulanacağı ifade edilmiştir. İdarenin, yüklenici organizasyon formunun şekillendirilmesinde etkin olduğu kadar organizasyon formunda bulunacak personelin sayısı ve niteliği konusunda da etkili olduğu görülmektedir.

Yapım işine ait organizasyon formlarının incelenmesi sözleşme öncesi ve sözleşmenin uygulanması olarak iki ayrı süreçte incelenmiştir. Sözleşme öncesi süreçte idare kamu kurumu olmasından dolayı 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu ve 4735 sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanununa tabidir. Sözleşme öncesinde idare, ihale hazırlık ve ihale sürecini Maliye Bakanlığı'na tabi olan idari ve mali özerkliğe sahip Kamu İhale Kurumu'na bağlı olarak ihale sürecini gerçekleştirmektedir (Şekil 7).



Şekil 7: Kamu satın alma süreci (Bayram, 2019)

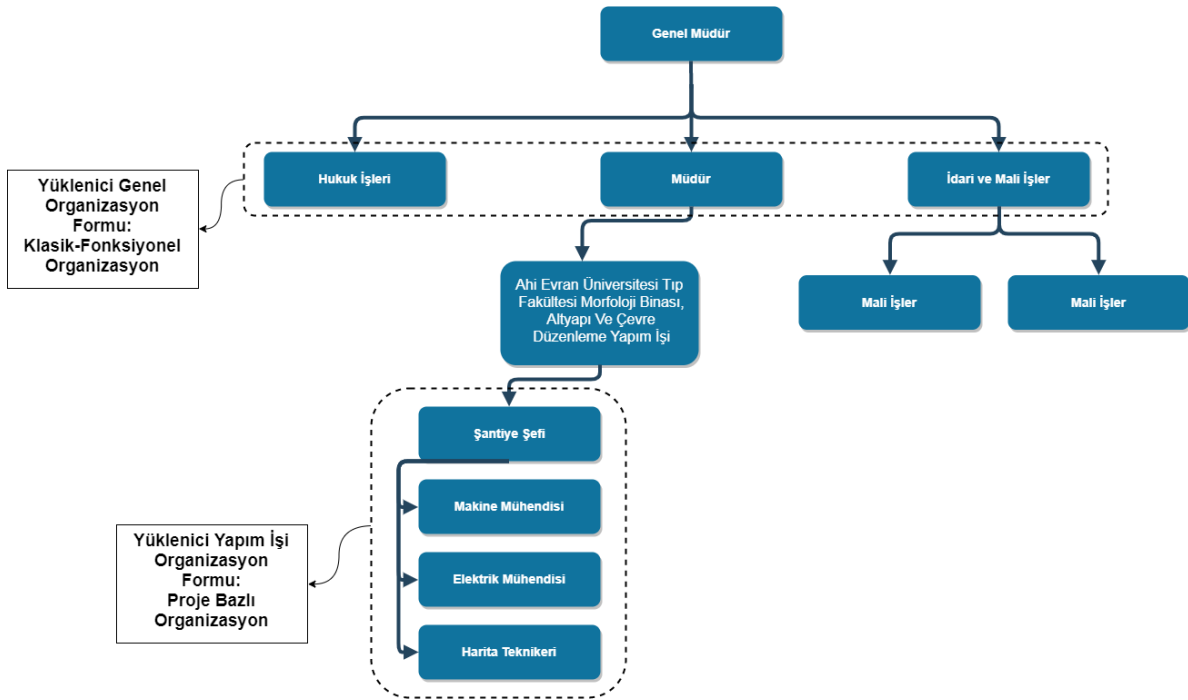
Sözleşmenin uygulanması aşamasında idarenin sahip olduğu organizasyon formu incelendiğinde kamu kurumlarında yaygın olarak kullanılan klasik-fonksiyonel organizasyon formu dikkat çekmektedir (Şekil 8).



Şekil 8: AEÜ Yapı İşleri Daire Başkanlığı organizasyon formu

Yüklenicinin sahip olduğu organizasyon formu genel şirket yönetimi ve şantiye yönetimi açısından ayrı olarak incelenmiştir. Şirketin inşaat, taş ocağı, maden ocağı, hazır beton, bims, sıcak asfalt gibi farklı alanlarda faaliyet göstermektedir. Şirket yönetiminde klasik-fonksiyonel organizasyon formu kullanılmaktadır.

Yapım işinin gerçekleştirilmesinde ise proje bazlı organizasyon formu kullanıldığı tespit edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9: Yüklenici organizasyon formları

4.2. Standardizasyon Etmeni ile İlgili Bulgular

Yapı endüstrisi, insan ihtiyaçlarının karşılanması için birçok disiplin ve sektörün bir araya gelmesi ile yapı ve yapay çevrenin üretildiği lokomotif sektördür. Yapay çevre ise insan yerleşimleri ve kentlerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Dolayısıyla yapı endüstrisinin ve bu bağlamda yapı üretim sürecinin, çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılaşmayı kapsayan standartların önemi gün geçtikçe artmaktadır. Araştırma kapsamında Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işine ait yapım işleri genel şartnamesi, idari şartname, sözleşme tasarısı, inşaat işleri genel şartnamesi ve inşaat işleri özel teknik şartnamesi; ulusal ölçekte yer alarak yapı endüstrisinin sürdürülebilirliğini kapsayan sekiz ayrı ulusal mevzuat kapsamında incelenmiştir. İlk olarak incelenen yapım işleri genel şartnamesi 52 maddeden oluşmaktadır. Maddeler standardizasyonlar doğrultusunda incelenmiştir. Bu doğrultuda;

- Şartnamenin 32. maddesi inşaat alanı içerisinde yer alan mevcut yapıların yıkılması ile ilgilidir. Madde içerisinde Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan atık ayıklanması, atık geri dönüşüm ve atık istif yerleri hakkındaki standartlara yer verilmemiştir.

Genel hususlar, inşaat işleri genel teknik şartnameleri, açıklamalar ve nakliyeler olmak üzere dört ana başlıktan oluşan inşaat işleri genel şartnamesi ulusal mevzuatlar doğrultusunda incelenmiştir. Bu doğrultuda;

- İnşaat işleri genel teknik şartnameleri içerisinde yer alan kaba inşaat işleri kapsamında yapılacak kazı işleri için TS 1500 (İnşaat Proje Müdürlüğü Toprak Sınıflandırma Sistemi), TS 1900 (İnşaat Proje Müdürlüğü Toprak Ölçüm Metotları), TS 2519 (Kaplama, Destek ve Destekleyici Çukurlar, Kazı vb.) standartları referans olarak belirlenmiştir. Ancak kazı işleri şartnamesi içerisinde Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliğinde yer alan atık ayıklanması, atık geri dönüşüm ve atık istif yerleri hakkındaki standartlara yer verilmemiştir.

- İnşaat işleri genel teknik şartnameleri içerisinde yer alan beton işleri kapsamında TS19 (Portland Çimentoları), TS 24 (Çimentoların Fiziksel Muayene Metotları), TS 46 (Genel Amaçlar için Kontrplak), TS 499 (Nervürlü Çelik Çubukların Betonarme Yapılarda Kullanım Kuralları), TS 500/TS 687 (Çimento Kimyasal Analiz Kuralları), TS 706 (Beton Agregaları), TS 707 (Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlanması Yöntemi), TS 708 (Beton Çelik Çubukları ve Çelik Hasırları), TS 802 (Beton Karışım Hesap Esasları), TS 1247 (Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları), TS 1248 (Betonun Karıştırılması, Yerleştirilmesi ve Kür Edilmesi), TS 2901 (Taze Betonda Hava Miktarının Basınç Metodu ile Tayini), TS 2940 (Taze Betondan Numune Alma Metotları), TS 2941 (Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini), TS 3068 (Laboratuvarlarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı), TS 3114 (Beton Basınç Dayanımı Deney Metodu), TS 3285 (Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi), TS 3453 (Beton Elemanlarında Büzülme Oranı (Rötre) Tayin Metodu), TS 3454 (Basınç Altında Beton Sünme Tayin Metodu), TS 3455 (Betonda Geçirgenlik Katsayısı Tayin Metodu), TS 3624 (Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Metodu), TS 3655 (Beton Agregalarında Dona Dayanaklık Tayini), TS 3673 (Beton Agregalarında Organik Kökenli Madde Tayini Deney Metodu), TS 3674 (Beton Agregalarında Sülfat Miktarı Tayin Metodu), TS 3694 (Beton Agregalarında Aşınmaya Dayanıklılık Tayini Metodu) standartları referans olarak belirlenmiştir. Bu standartlar ile şartnamenin yapı malzemeleri yönetmeliğine bağlı olduğu tespit edilmiştir.
- İnşaat işleri genel teknik şartnameleri içerisinde yer alan açıklamalar başlığı altında atık malzemelerin geri dönüşümü, istiflenmesi ve atılması ile ilgili veriler yer almaktadır. Ancak içerisinde Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği referans gösterilmemiştir.

İnşaat işleri birim fiyatlı imalatlar dizini ve genel konular olmak üzere 2 ana başlıktan oluşan inşaat işleri özel teknik şartnamesi ulusal mevzuatlar doğrultusunda incelenmiştir. Bu doğrultuda;

- İnşaat işleri birim fiyatlı imalatlar dizini içerisinde yer alan yapı taşları işlerinde TS 699, TS 1341 (prEN), TS 6234 standartları, cephe kaplaması işlerinde TS 4922 standardı, alüminyum fotoselli kapılarda TSE, CE, TUV ve ISO belgesi, yangına dayalı camlı kapılarda TS 914 standardı, kompozit malzemelerde TS 498 ve DIN 1055 standartları, camlarda TS 10288 EN 572-2, TS 3539-1 EN 1279-1/AC ve TS EN 12150-2 standartları referans gösterilmiştir.
- Şartname içerisinde yapı ve çevresinin engelli kullanımına uygun olması için TS 9111 (Özürülüler ve Hareket Kısıtlılığı Bulunan Kişiler için Binalarda Ulaşılabilirlik Gereklere), TS 12576 (Şehir İçi Yolları-Kaldırım ve Yaya Geçitlerinde Ulaşılabilirlik için Yapısal Önlemler ve İşaretlemelerin Tasarım Kuralları), TS23599 (Görme Özürlü veya Az Görenler için Yardımcı Mamuller - Hissedilebilir Yürüme Yüzeyi İşaretleri), TS EN 1871 ve TS EN 1436 standartları referans gösterilmiştir. Bu durum engelli kullanımına verilen önemi göstermektedir.

İhalenin konusu ve teklif vermeye ilişkin hususlar, ihaleye katılmaya ilişkin hususlar, tekliflerin hazırlanması ve sunulmasına ilişkin hususlar, tekliflerin değerlendirilmesi ve sözleşme yapılmasına ilişkin hususlar ve sözleşmenin uygulanması ve diğer hususlar olmak üzere beş ana bölümden oluşan idari şartnamedeki maddeler, 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu ile 4735 Kamu İhaleleri Sözleşmeleri Kanunu ile ilişkilendirilmiştir. 35 maddeden oluşan sözleşme tasarısında ise inşaat işlerinin tüm risklere karşı (all-risk) sigortalanması standardı belirtilmiştir. Aynı zamanda inşaat işleri ile ilgili maddeleri Yapım İşleri Genel Şartnamesi hükümleri ile ilişkilendirilmiştir.

İnceleme doğrultusunda İnşaat İşleri Genel Şartnamesi ve İnşaat İşleri Özel Teknik Şartnamesinde yer alan maddeler içerisinde, TSE'nin yayımlamış olduğu Yapı Malzemeleri Yönetmeliğinde yer alan standartlarının referans gösterildiği tespit edilmiştir. Yapım İşleri Genel Şartnamesi, İdari Şartname ve Sözleşme Tasarısında yer alan maddeler içerisinde literatür araştırması

AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ TIP FAKÜLTESİ MORFOLOJİ BİNASI YAPIMININ ORGANİZASYON VE STANDARDİZASYONU

doğrultusunda belirlenen sekiz ulusal mevzuat ve standardın yer almadığı tespit edilmiştir (Tablo 3). Beş ayrı doküman içerisinde;

- Yapı ve yapı bileşenleri üretimi sürecindeki çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlere olumsuz yöndeki etkilerinin en aza indirilmesinin gerekli kılan 2872 sayılı Çevre Kanunu ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.
- Üretilen yapı ve yapı bileşenleri üretiminin çevreyi olumsuz etkilemesinin azaltılması için teknoloji alternatiflerinin belirlenerek değerlendirilmesinde ve üretim sürecinin izlenmesi ve kontrolünde sürdürülecek çalışmaları içeren Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.
- Yapı üretimi ve geri dönüşüm sürecinde oluşan hafriyat toprağı ve inşaat atıklarının geri dönüşümü ve bertarafı ile ilgili standartlar getiren Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.
- İnşa edilmiş bir binanın kullanım sürecinde yer alan ilgili kişi, kurum ve kuruluşlara enerji verimliliği ve yenilebilir enerji kavramları kapsamında standartlar getiren Enerji Verimliliği Kanunu ve Bina Enerji Performansı (BEP) Yönetmeliği ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.
- Binayı oluşturan yapı elemanlarının yalıtım özelliklerini, ısıtma ve/veya soğutma sistemlerinin verimi ve enerji ihtiyacı ile ilgili bilgileri içeren yapıları enerji standartlarına göre sınıflandıran Enerji Kimlik Belgesi sistemi ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.
- Mevcut ve yeni inşa edilecek binaların teknik özelliklerini ve ihtiyaçlarını dikkate alarak, çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesini ve belgelendirilmesini kapsayan Binalar ile Yerleşmeler için Yeşil Sertifika Yönetmeliği ile ilgili herhangi bir madde yer almamaktadır.

Tablo 8: Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, Altyapı ve Çevre Düzenleme Yapım İşine ait dokümanların standardizasyon değerlendirilmesi

Yapı Sektöründe Standardizasyon Sağlayan Yasal Mevzuatlar	Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, Altyapı Ve Çevre Düzenleme Yapım İşİ				
	Yapım İşleri Genel Şartnamesi	İdari Şartname	Sözleşme Tasarısı	İnşaat İşleri Genel Şartnamesi	İnşaat İşleri Özel Teknik Şartnamesi
Çevre Kanunu	-	-	-	-	-
Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği	-	-	-	-	-
Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği	-	-	-	-	-
Enerji Verimliliği Kanunu	-	-	-	-	-
Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği	-	-	-	-	-
Enerji Kimlik Belgesi	-	-	-	-	-
Binalar ile Yerleşmeler için Yeşil Sertifika Yönetmeliği	-	-	-	-	-
Yapı Malzemeleri Yönetmeliği	-	-	-	√	√

5. SONUÇ

Yapı endüstrisi, insan ihtiyaçlarının karşılanması için birçok disiplin ve sektörün bir araya gelmesi ile yapı ve yapay çevrenin üretildiği lokomotif sektördür. Yapay çevre ise insan yerleşimleri ve kentlerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Dolayısıyla yapı endüstrisinin ve bu bağlamda yapı üretim sürecinin, çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılaşmayı kapsayan standartların ve organizasyonların önemi gün geçtikçe artmaktadır. Araştırma kapsamında proje yönetim etmenlerinden standardizasyon ve organizasyonun Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işine ait yapım işleri genel şartnamesi, idari şartname, sözleşme tasarısı, inşaat işleri genel şartnamesi ve inşaat işleri özel teknik şartnamesindeki maddeler incelenmiş, standardizasyon ve organizasyon düzeyinin yapı sektörü içerisinde durumu tespit edilmiştir.

İlk olarak alan çalışması, proje yönetiminin ana etmenlerinden organizasyon açısından incelenmiştir. Yapım işinin tarafları olan idare ve yüklenici açısından bakıldığında her iki tarafın idari açıdan kullanmakta oldukları organizasyon formları benzerdir. Sözleşmenin uygulanması aşamasında ise idare görevlendirdiği yapı denetim elemanları ve kendi teknik personeli ile klasik-fonksiyonel organizasyon formu kullanmaktadır. Yüklenici ise, uygulama aşamasında proje bazlı organizasyon formunu kullandığı görülmektedir.

İdarenin uygulamada üretim ve denetim mekanizmasının çalışmasında kullandığı klasik-fonksiyonel organizasyon formu kamu yapım işlerindeki idari yapılanmada sıklıkla kullanılmaktadır. İdari kontrol mekanizmasının kolay yürütülmesi, raporlamanın basit olması ve insan kaynaklarının esnek kullanımı açısından tercih sebebi olsa da eserin idarenin talepleri, teknik ve özel şartnamelere uygun meydana getirilmesinde yaşanacak eksikliklerin, ayıpların ve ihmallerin tespitinde yeterince etkili olmamaktadır. Kullanılan organizasyon formunda sorumluluğun tespitinde ciddi zorluklarla karşılaşmakta ve genel proje hedefinin tüm çalışanlarca benimsenmesi tam olarak sağlanamamaktadır. Aynı anda yüklenicinin proje bazlı organizasyon formunu uygulama aşamasında kullanması idarenin taleplerine yönelik hızlı reaksiyon alabilecek bir organizasyon yapısı vurgusunu göstermektedir. Şantiye şefine tanınan geniş yetki, karar verme mekanizmasının hızlı olması ve süre, maliyet ve kalitede idarenin taleplerine göre sağlanacak esneklik ancak bu organizasyon formu ile gerçekleştirilebilir. Kamu kaynaklarının doğru ve etkili kullanımı açısından idarenin sözleşmenin uygulama aşamasının denetimi ve takibinde daha etkili bir organizasyon formu kullanması gerekmektedir.

Alan çalışması olarak ele alınan bina proje yönetiminin ana etmenlerinden standardizasyon açısından incelenmiştir. Standardizasyon çevresel sorunların azaltılmasından ulusal rekabet gücünün ve pazar payının artmasına kadar birçok anlamda toplumsal fayda sağladığı tespit edilmiştir. Literatür kapsamında elde edilen sonuçları genel olarak incelendiğinde, Türkiye`de yapı malzemesi sektöründe standardizasyonun kavramının yerleşmekte olduğu görülmektedir. Gelişen teorik bilginin uygulama sürecindeki durumu kamu yapısı üzerinden ele alınmıştır. Çalışma kapsamında Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası ve bu yapıya ait altyapı ve çevre düzenleme yapım işine ait dokümanlar, çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerinin sağlanması için ulusal yönetim tarafından çıkarılmış yönetmelikler ve mevzuatlar doğrultusunda incelenmiştir. Dokümanların sadece ikisinin Yapı Malzemeleri Yönetmeliğine uygun olduğu, diğer yedi ayrı mevzuata uygun olmadığı tespit edilmiştir. Ülkemiz yapı sektörünü kapsayan standardizasyonların teorik açıdan geliştiği ancak yapılarda uygulanmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda ülkesel ölçekteki yapı endüstrisinde kullanılan kaynakların doğru şekilde uzun yıllar değerlendirilmesi için yapım işlerine ait dokümanların ulusal yönetmelikler ve mevzuatlar doğrultusunda hazırlanması ve yapım sürecinde uygulanması gerekmektedir.

Çalışmada; ülkemizde yapı endüstrisinin sürdürülebilir olması için çıkarılan mevzuatların ve standartların 4734 Sayılı Kamu İhale Kanunu doğrultusunda yapılan Ahi Evran Üniversitesi Tıp Fakültesi Morfoloji Binası, Altyapı ve Çevre Düzenleme yapım işinde kullanılmadığı tespit edilmiştir. Ulusal mevzuatların ve standartların kamu yapılarında kullanılması için 4734 sayılı Kamu İhale

Kanunu ile 4735 Sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanununda güncelleme yapılması gerekmektedir. Böylelikle kamu yapılarının özel yapıların tasarlanmasına ve inşa sürecine örnek teşkil etmesi sağlanmış olacaktır. Meslek odaları ve sivil toplum kuruluşlarının kamu ve yerel yönetimlerle birlikte çalışmaları ile standardizasyon ve organizasyon kavramlarının teorikte geliştiği kadar yapım sürecinde de gelişeceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, ulusal mevzuat ve standartların her yapı bileşenini kapsayacak duruma gelmesi elzemdir. Ancak bu standartların gelişmesi ve kapsamlı hale gelmesi ile ülkesel ölçekteki endüstriyel üretimde kaynakların doğru şekilde uzun yıllar değerlendirilmesi ile çevresel sorunların önüne geçilecek, paralelinde yapı malzemeleri açısından dış ülkelere olan bağımlılık azalacak ve ülkemizin ekonomik boyutta kendi kendine yetmesi ile beraber her alanda kalkınma sağlanacaktır.

Bu çalışmanın gelecekte bu alanda yapılacak akademik çalışmalara emsal teşkil etmesi, proje yönetim etmenlerinden standardizasyon ve organizasyonun kullanımını artırmaya yönelik olarak yüklenici firmalara ve işverenlere yol gösterici olması ve alana katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

6. KAYNAKÇA

Akdoğan, A.A. (1994). İşletmelerde büyüme ve büyüyen işletmelerde örgütlenme sorunları üzerine bir uygulama. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 11, 165-182.

Alan, F. (2013). Standardizasyonun ekonomik ve sosyo-ekonomik getirileri. Verimlilik Dergisi, Cilt 0(4), 127-144.

Avşar, Z. (2003). Türkiye ve Türk Cumhuriyetleri arasında pazarlama iletişimi açısından tüketicinin korunması kalite ve standardizasyonun önemi. Bilig Dergisi, 26, 45-76.

Barnard, C. I. (1938). The functions of the executive. Cambridge: Harvard University Press.

Bayram, S. (2019). İnşaat yönetiminde sistem planlama ders notları. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

Benek, İ., & Ulucan, Z. Ç. (2007). Yapı yönetimi ve organizasyon. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 6(1), 44-49.

Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, BSTB (2017). Ulusal standardizasyon strateji belgesi ve eylem planı (2017-2020). Retrieved from http://www.sp.gov.tr/tr/temel-belge/s/159/Ulusal+Standardizasyon+Strateji+Belgesi+ve+Eylem+Plani+_2017-2020

Casey, C. (2002). Critical analysis of organizations: Theory. London: SAGE Publications.

Cheng, M.Y., Su, C.W., & You, H.Y. (2003). Optimal project organizational structure for construction management. Journal of Construction Engineering and Management, 129(1), 70-79. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(70)

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2014). Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği. Resmi Gazete Tarihi: 25.11.2014, Resmi Gazete Sayısı: 29186. Retrieved from <https://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.20235&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=%C3%87evresel%20Etki>

Çınar, R. (1984). Standardizasyonun sosyo-ekonomik önemi. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2(3), 135-142.

Daft, R. L. (2008). Organization theory and design. Ohio: Thomson/South-Western.

Ekici, S. (2006). Proje organizasyonlarının yönetimi ve inşaat sektöründe bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Erik, E. (1998). Yapı üretiminde proje yönetimi ve bilgi alanları. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ertuğ, A. (2015). Standart ve standardizasyon. Ankara: Ankara Ticaret Borsası.

Gültekin, T. (2007). Proje yönetimi yapım öncesi süreci. Ankara: Palme Yayınevi.

Hendrickson, C., & Au, T. (1989). Project management for construction: Fundamental concepts for owners, engineers, architects, and builders. Pittsburgh, PA: Prentice-Hall.

Kara, I. (2004). Türkiye koşullarında profesyonel proje yönetim şirketlerinin yapısı için model önerisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kerzner, H. (2009). Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons.

Lillrank, P. (2003). The quality of standard, routine, and non-routine processes. Organization Studies, 24(2), 215-233. doi: 10.1177/0170840603024002344

Manisa Celal Bayar Üniversitesi-MCBÜ. (2019). Kalite güvencesi ve standartları ders notları. Retrieved from https://turgutlumyo.mcbu.edu.tr/db_images/file/kalite-guvencesi-ve-standartlari-ders-notlari-3022TR.pdf

Project Management Institute, PMI (2013). Proje yönetimi bilgi birikimi (PMBOK) kılavuzu. Pennsylvania, US.

Sorguç, D. V. (2005). İnşaat uygulama ve yönetim mühendisliği kapsamında proje yönetiminin temel ögesi: insan (niteliği). 3. Yapı İşletmesi Kongresi, 29-30 Eylül, Maya Matbaacılık, 54-67.

Taner, Z. T. (2019). Sürdürülebilir kalkınma bağlamında yapım yönetiminin Çukurova bölgesinde incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Tosun, A. B. (2019). YBM standartlarının karşılaştırmalı incelenmesi ve ulusal standardizasyon çalışmaları açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Vries, H. J. (2006). Standards for business-how companies benefit from participation in international standards setting. International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland.

Wallace, W. L. (1963). The Winchester-Western division concept of product planning. New Haven: Olin Mathieson Corporation.

Yurtoğlu N. (2018). Türk standartları enstitüsünün (TSE) kuruluşu bağlamında Türkiye’de standardizasyon politikaları (1923-1960). International Journal of History, 10(7), 241-264.

İnternet Kaynakları:

<https://www.ahievran.edu.tr/>, (Erişim tarihi: Aralık 2019).

<https://www.ertproje.com/portfolio/ahi-evran-universitesi-tip-fakultesi-morfoloji-binasi/>, (Erişim tarihi: Aralık 2019).

<https://www.cmaanet.org>, (Erişim tarihi: Kasım 2019).

<https://www.google.com/intl/tr/earth/>, (Erişim tarihi: Aralık 2019).

<https://www.iso.org/home.html>, (Erişim tarihi: Aralık 2019).

<https://www.mgm.gov.tr>, (Erişim tarihi: Ocak 2020).

<https://www.pmi.org/>, (Erişim tarihi: Kasım 2019).

<https://www.tse.org.tr/>, (Erişim tarihi: Ocak 2020).

TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMIYLA PROTEZ TASARIMI

Arzum Işıtan*, Tayfun Uluşal

* Pamukkale Üniversitesi, Pamukkale, Denizli

aisitan@pau.edu.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Tersine mühendislik (TM), bir nesnenin, yüksek değerli ticari parçaların veya tarihi restorasyon işlemlerinde eski parçaların yeniden oluşturulması için uygulanan bir yöntemdir (Wang, 2011). Bir parçaya ait teknik verilerin ve özelliklerin geliştirilmesi için, mevcut parçaların fiziksel olarak incelenerek ve ölçülerek, işlevsel ve boyutsal olarak kopyalanma sürecidir (US ARMY, 2006). Böylece ortaya çıkan yeni tasarımlar, ürünü daha hızlı pazara sürmeyi kolaylaştırmaktadır. Tasarım, yaratıcı düşünme ve problem çözme sürecidir (Ye vd,2008). Tasarımın yeniden kullanımıyla, gelecek tasarımların iyileştirilmesi ve bir önceki tasarımdan üst düzey bilgi sahibi olabilmeyi kolaylaştırır (Sanghee & Bracewell Rob, 2007). Tasarım ve tasarıma ait bilgilerin yeniden kullanımı, yeni ürün geliştirme maliyetlerini de azaltmanın anahtarıdır (Ye vd, 2008).

Hassas donanım ve gelişmiş yazılım kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda, parça geometrik detayları kolay bir şekilde görselleştirilebilir ve ölçülebilir. Ayrıca, elde edilen ham veriler bilgisayar modellemesine dönüştürülebilir (Wang, 2007). Tersine Mühendislik, özellikle bilgisayar destekli tasarım ve üretim yazılımları ve donanımları kullanılarak, var olan parçaların 3 boyutlu (3B) sanal modellerinin oluşturulması için kullanılmaktadır. Nesnenin boyutları; koordinat ölçme makinesi (Coordinat measuring machine, CMM) veya üç boyutlu üçgenli lazer tarayıcılar gibi ölçüm cihazları kullanılarak ölçülebilmektedir (Çilli, 2009).

Bu bağlamda, tersine mühendislikte kullanılan ekipmanları donanım ve yazılım olarak ikiye ayırmak mümkündür (Önçağ vd, 2018). Donanımlar, ölçüm işlemlerini gerçekleştirmek için gerekli olan ekipmanlardır. TM işlemlerinde veri toplama için temaslı ve temassız olarak gruplandırılabilen iki ana teknik bulunmaktadır (Önçağ vd, 2018; Varady vd, 1997; Le vd, 2010). Temaslı yöntemler bir yüzeyi dijitalleştirmek için mekanik kolları algılama cihazları, Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM) ve Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) makineleri olarak sınıflandırılabilir. CMM'ler, ölçülecek bileşen karmaşık bir şekle sahip nesnelerin hassas ölçümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır (Peggs vd, 1999; Park vd, 2006)). CMM'lerin en büyük problemi, algılama probunun ve kılavuz raylar ve kılavuz vidaların doğruluğundan çok etkilenmesidir (Park vd, 2006). Temaslı olanlar hassas ölçüm yapabilmelerine karşın, yavaş çalışan sistemlerdir. Temassız yöntemlerle, bir nesnenin geometrisini temsil eden 2B kesit görüntüleri ve nokta bulutları, enerji kaynaklarının (ışık, ses veya manyetik alanlar) bir nesneye iletilmesi ve yansıyan enerjinin gözlemlenmesi yoluyla çalışırlar. Veri toplama işlemi sırasında TM donanımı ile bir nesne arasında temas yoktur (Le vd, 2010).

Geleneksel mühendislik uygulamaları ile tasarım ve modeller gerçek parçalara dönüşürken, tersine mühendislik uygulamalarında gerçek parçalar tasarım ve modellere dönüştürülmektedir (Varady vd, 1997). Tüm bu uygulama kolaylığı, hız ve kişiselleştirilebilir özellikleri sayesinde tersine mühendislik uygulamaları makine, otomotiv, havacılık, medikal, dental, arkeoloji ve sanat tarihi gibi birbirinden çok farklı alan ve sektörlerde kendisine uygulama ve kullanım yeri bulmaktadır (Önçağ vd, 2018; Wang, 2011; Cha vd, 2007).

Tersine mühendisliğin medikal alandaki uygulamalarına Tıbbi (Medikal) Tersine Mühendislik uygulamaları denilmektedir (MRE). Hastanın anatomik verilerinin veya biyomedikal nesnelerin

modellerinin oluşturulması ve farklı biyomedikal araştırmaların geliştirilmesi için kullanılır (Le vd, 2010). In vitro medikal uygulamalarda, manyetik rezonans görüntüleme (MRI), bilgisayarlı tomografi (BT) ve 3B lazer tarama teknikleri de kullanılabilir (Lupi & Sant, 2007). Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve bilgisayarlı tomografi (BT) biyomedikal amaçlar için geometrik bilgi elde etmek için kullanılmaktadır. MRI, nükleer manyetik rezonans prensiplerini içeren çok yönlü, güçlü ve hassas bir araçtır. MRI ile elde edilen görüntünün kalitesi manyetik alanın gücü ile yakından ilişkilidir. Diğer yandan, bir BT tarayıcı, insan vücudunun iç yapısını görüntülemek için X ışınlarının kullanıldığı bir yöntemdir. Hem MRI hem de BT artık yüksek doğrulukta veri alabilir ancak, bu görüntüleme tekniklerinin maliyeti yüksektir (Liu vd, 2016; Geng & Bidanda, 2017). Mekanik analizler için 3B biyomekanik modellerin katman filmlerini sağlamaktadır. Kemiklerin 3B modellenmesinde BT kullanılırken, yumuşak dokuların modellenmesinde MRI cihazı kullanılmaktadır (Erden, 2019).

Medikal uygulamalarda, kişiye özgü tasarım ve imalat gün geçtikçe daha fazla önem kazanmakta ve geçmişe göre çok daha kolay uygulanmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle tersine mühendislik uygulamaları incelenmiştir. Diz altı amputasyonu için prototip protez tasarımı ve imalatı için gerekli olan aşamalar incelenmiş ve uygulanmıştır:

- İnsan vücudu üzerinden ölçüm alma,
- Verileri sayısallaştırma,
- CAD modeli oluşturma,
- Model düzeltme ve doğrulama,
- Protez iç mekanizma çalışması,
- 3B üretim.

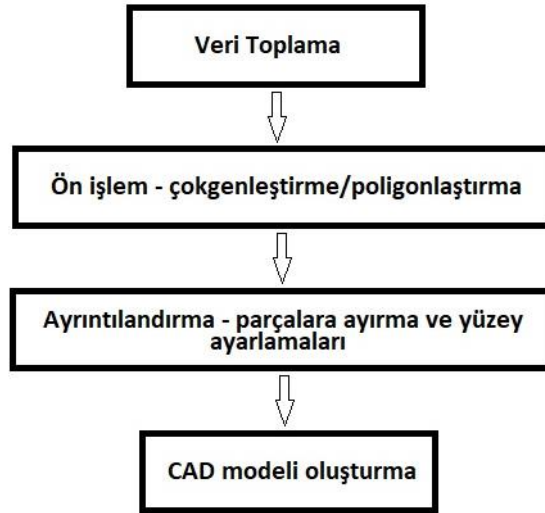
2. TERSİNE MÜHENDİSLİK

Özellikle 1990'lü yıllardan itibaren, özellikle kişiselleştirilmiş medikal cihazların (implant, ortez ve protez gibi), cerrahi aletlerin ve tıbbi eğitim materyallerinin tasarım ve imalatında tersine mühendislik uygulamaları yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Hieu vd, 2010/1). Hastadan 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak BT veya MRI ile alınan verileri kullanarak, cerrahi operasyonlar için gerekli medikal cihazların kişiye özel olarak üretimi söz konusudur (Hieu vd, 2010/2; Dussa vd, 2005; Milusheva vd, 2006; Wang, 2011; Lupi & Sant, 2007). Örneğin tersine mühendislik, kemik örneklerinin sanal bir vücut içi ortamda simülasyonunun yapılmasına ve analiz edilmesine izin verir (Lupi & Sant, 2007).

İnsanlık tarihi boyunca yeni bir buluşun keşfi ve geliştirilmesi bazen onyıllar hatta yüzyıllar sürerken, teknolojinin gelişimi ile bu süre oldukça kısalmıştır. Tersine mühendislik uygulamaları da bu süreçlerin kısalmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, ürün maliyetleri de düşmektedir (Wang, 2011).

Tersine mühendislikteki süreç, Şekil 1'de görüleceği üzere, dört aşamaya ayrılabilir (Wang, 2011; Varady vd, 1997; Geng & Bidanda, 2017):

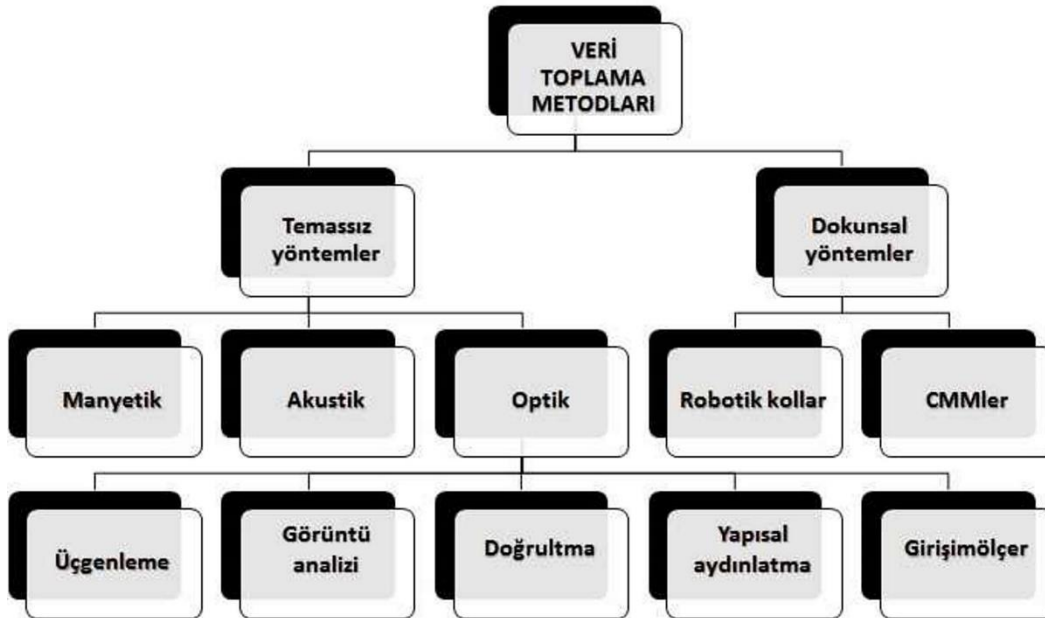
1. Veri toplama,
2. Ön işlem -çokgenleştirme/poligonlaştırma,
3. Ayrıntılandırma - parçalara ayırma ve yüzey ayarlamaları
4. CAD modeli oluşturma



Şekil 1. Tersine mühendislik süreci

2.1. Veri Toplama

Bir nesneyi yeniden yapılandırmanın ilk aşaması olan sayısallaştırmanın en büyük zorluklarından biri, parçanın geometrik detaylarını yakalayabilmektir. Nesnenin dış ölçülerinin sayısallaştırılması için temaslı, temassız veya hibrit olarak gruplandırılan problemler ve tarayıcılar kullanılmaktadır. Şekil 2’de temaslı ve temassız veri toplayıcıların sınıflandırılması görülmektedir (Varady vd, 1997).



Şekil 2. Temaslı ve temassız veri toplama metotları (Varady vd, 1997)

Problemler, verileri doğrudan temaslı veya temassız olarak elde etmek için kullanılır. Temaslı çalışan problemler, en ekonomik 3B sayısallaştırıcıdır. Hedef nesnedeki sınırlı sayıda noktayı ölçer. Ölçülen noktaları sayısallaştırmaya yönelik kullanılan bir yazılım vasıtasıyla verileri bir bilgisayara geri gönderir. Basit geometrik şekillere sahip küçük boyutlu parçalar için kullanılır ve genellikle yüksek oranda doğruluk sağlar (Wang, 2011; Varady vd, 1997; Geng & Bidanda, 2017).

Yaklaşık yarım asır önce, insan tarafından nesne üzerinden ölçümler alınarak yani manuel olarak ölçümler yapılırken, artık bilgisayar destekli uygulamalar kullanılmaktadır. Bu amaç için kullanılan makinelerden ilki ve günümüzde hala yaygın olarak kullanılan cihaz, koordinat ölçüm makineleridir (CMM).Tarama yani sayısallaştırma için veri toplama işlemi, çeşitli serbestlik derecelerine sahip olan ve uzatılmış bir kol gibi yapılandırılmış bir (CMM) kullanılarak gerçekleştirilir. CMM, parça ile temas halinde olan ve temasla birlikte oluşan basıncı hassas bir şekilde algılayabilen bir temas probu kullanarak, nesnenin üzerinden noktaların ölçümünü sağlayan bir cihazdır. (Wang, 2011; Geng & Bidanda, 2017).

Dokunsal ölçüm için kullanılan robotik kollar, çok daha doğru ve tekrarlanabilir bir yöntem olmasına rağmen, veri toplama için en yavaş yöntemdir (Varady vd, 1997).

Temassız yöntemlerde ölçüm aracı olarak ışık, lazer, ses, manyetik alan veya X-ışınları kullanılmaktadır (Geng & Bidanda, 2017).

Manyetik rezonans, nesnenin iç özellikleri ölçülecek olduğunda ultrasona benzer uygulamalarda kullanılmaktadır. MRI (manyetik rezonans) ölçülecek materyal içindeki atomları aktive eder ve daha sonra yanıtı ölçmektedir (Varady vd, 1997).

Akustik yöntemler, başta sonar olmak üzere ultrason cihazlarında da uzun yıllardır kullanılmaktadır. Yöntem esas olarak bir ses kaynağıyla yansıtıldığı yüzey arasındaki mesafenin ölçümüne dayanmaktadır. Ancak parazitlenme veya gürültü, yöntemin ölçüm doğruluğunu etkilemektedir (Varady vd, 1997).

Üçgenleme, yüksek enerjili bir ışık kaynağı ve bir dedektör/kamera içeren sistemden ölçüm noktalarının nirengi ağını oluşturarak geometrik veri elde etme prensibine dayanır. Bu yöntemde, lazer başta olmak üzere farklı yüksek enerjili ışık kaynakları kullanılabilir. Yöntemin doğruluğu dedektör/kameranın çözünürlüğüne ve yüzey ve tarayıcı arasındaki mesafeye bağlıdır (Varady vd, 2007; Önçağ vd, 2018; Geng & Bidanda, 2017).

Yapılandırılmış ışık tabanlı sistemlerde (Structured lighting), tek bir ışık demeti veya bir ışık şeridi yerine, nesnenin yüzeyine ışık kalıplarının yansıtılmasını içerir. Ölçülen yüzeyin geometrik bilgileri, video kameraya yansıtılan sonuç modellerinin yani veri noktalarının koordinatlarının belirlenmesi için görüntülerin analiz edilmesiyle elde edilmektedir (Varady vd, 2007; Önçağ vd, 2018; Geng & Bidanda, 2017).

Doğrultma/aralık (Ranging) yöntemleri lazer veya darbeli ışınların uçuş zamanını algılayarak mesafeleri ölçmektedir. Karşılıklı etkileşim/girişimölçer (İnterferometri) yöntemleri, karşılıklı etkileşimleri kullanarak mesafeleri dalga boyları cinsinden ölçer. Uygulamada, hem nesneyi incelemek için tek renkli bir ışık demeti hem de bir referans sağlamak için yüksek enerjili bir ışık kaynağı kullanılır. Bu yöntem ile çok hassas ölçümler alınabilmektedir (Varady vd, 2007).

Yukarıda bahsi geçen yöntemlerin her birinin ölçüm süresi ve ölçüm hassasiyeti birbirinden farklıdır. Temaslı yöntemler ölçüm doğruluğu olarak avantajlı olmasına rağmen, veri toplama süreleri çok uzundur. Temassız yöntemler daha hızlı veri toplayabilmekle birlikte ölçüm hassasiyeti temaslı yöntemlerden daha düşüktür. İki veya daha fazla sayısallaştırma yöntemini bir arada kullanan hibrit yöntemler, hem hızlı tarama hızı hem de yüksek ölçüm hassasiyeti gereksinimlerini karşılamaktadırlar. Hibrit tersine mühendislik veri toplama yöntemleri üzerine güncel araştırmalar ağırlıklı olarak sensör seçimi, tarama yolu planlaması ve koordinat sistemi birleştirmesine odaklanmaktadır. Örneğin temassız tarama tekniklerinin bir CMM'ye entegre edilmesiyle, temassız yöntemleri yol planlaması için ve CMM'lerin doğru veri toplamak için kullanılması gibi. Veya çoklu sensör yaklaşımıyla, bir lazer tarayıcıya görüntü sensörüne sahip bir kameranın (CCD) entegre edilmesi gibi yöntemler giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır (Geng & Bidanda, 2017; Bradley & Chan, 2001; Carbone vd, 2001; Sładek vd, 2011; Chan vd, 2001).

2.2. Ön İşlem -Çokgenleştirme/Poligonlaştırma

3B sayısallaştırma olarak da adlandırılan üç boyutlu tarama, fiziksel bir nesnenin yüzeyinde çok sayıda noktanın x, y, z kartezyen koordinatlarının elde edilmesidir. Tüm noktaların bir araya getirilmesiyle "nokta bulutu" elde edilir (Wang, 2011). Sayısallaştırma süreçleriyle elde edilen ham veri bulutunun CAD/CAM bilgisayar platformları tarafından kullanılmadan önce belirli formlara dönüştürme de dahil olmak üzere bazı ön işlemlere ihtiyacı vardır (Bidanda vd, 1991; Geng & Bidanda, 2017). Nokta bulutu, çokgen örgü veya düzgün olmayan rasyonel B-eğrisi (NURBS) gibi uygun bir biçime dönüştürülmeden, çoğu mühendislik uygulamasında doğrudan kullanılamaz (Wang, 2011). En fazla kullanılan teknikler arasında tel çerçeve modelleme, yüzey modelleme ve katı modelleme sayılabilir (Xu, 2009).

İlk aşama, ham verilerin düzeltilmesi ve aykırı değerlerin çıkarılmasıdır. Daha sonra, veri bulutu bir CAD sisteminin tanıyabileceği belirli bir formata dönüştürülür. CAD dili geometrik tabanlıdır (Geng & Bidanda, 2017). Nokta bulutu verileri için tipik biçimler ya her nokta için x, y, z değerlerini içeren bir Amerikan Bilgi Değişimi Standart Kodu (ASCII) metin dosyası ya da nokta bulutunun STL dosya biçimi olarak bilinen üçgen örgüye sahip poligonal bir model şeklindedir. Üçgensel yüzeyler ile üç boyutlu bir nesnenin geometrisini tanımlar. STL dosyaları, herhangi bir renk, doku veya diğer yaygın CAD modeli nitelikleri belirtmeksizin yalnızca nesnenin yüzey geometrisini tanımlar (Wang, 2011). STL, bilgisayar destekli tasarım (CAD) uygulamalarında, 3 boyutlu olarak tasarlanmış bir parçanın bilgilerini içeren ve başka bir programa aktarılabilmesini sağlayan bir dosya formatıdır. Günümüzde hızlı prototipleme, 3B yazıcı ve dijital üretim sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. STL 'in açılımı "STereoLithography" olarak nitelendirilebileceği gibi, bazı kaynaklarda "Standard Triangle Language" ya da "Standard Tessellation Language" şeklinde de kullanılmaktadır (STL, 2020).

Fiziksel nesnelerin üretimini gerçekleştirmek için kullanılacak olan 3B model verilerini standart bir veri şekli olarak saklayan dosya şeklidir. 3B tasarım programı ne olursa olsun, hepsi 3B yazıcılar ile uyumlu *STL dosya formatını desteklemektedir. 3B tasarım sürecinin ardından oluşturulan modeller, STL formatında 3B yazıcıların ara yüzlerine aktarılırlar. 3B tasarlanmış modelin yüzeylerinin matematiksel bir dizi içerisinde çok sayıda üçgene bölünmesiyle oluşturulan bir dosya formatıdır. Üçgenlerin sayısı arttıkça 3B modelin detay seviyesi de aynı oranda artmaktadır (Tridi, 2020).

Bir diğer önemli seçenek nokta bulutu verilerinin eğri ve yüzeye cebirsel veya parametrik formlarda işlem görmesidir. Cebirsel formlar, hedef yüzeyin üç boşlukta $f(x,y,z) = 0$ örtülü bir denklemi veya homojen bir polinom denklemi $f(x,y,z,w) = 0$ ile temsil edilebileceğini varsaymaktadır (Chivate & Jablowski, 1995; Boender, 1991; Geng & Bidanda, 2017).

Parametrik formda, yüzey veya eğriler u ve v ile gösterilen parametreler ile ifade edilmektedir. Parametrik formda Bézier'in yüzeyi/eğrisi, Bspline yüzeyi/eğrisi ve düzgün olmayan rasyonel yüzey/eğrisi (NURBS) temel gösterim tipleridir (Geng & Bidanda, 2017).

Düzgün olmayan rasyonel B-spline (NURBS) yüzey, bir modelin yüzeyini temsil etmek için basit iki boyutlu çizgi, daire, yay veya eğriden en karmaşık 3B serbest biçimli yüzeye veya katıya kadar herhangi bir şekli çok doğru bir şekilde tanımlayabilmektedir. Üçgen ve köşelerden oluşan çokgen modelinin aksine sürekli bir yapıya sahiptir. Bir NURBS yüzeyi bir çokgenden oluşturulabilir ve bir NURBS yüzeyinin sapma veya uyum hataları bir renk kodu veya farklı bir gri seviyesi ile doğrulanabilir. Bir poligonal modelden üretilen bir NURBS yüzeyinin bir CAD sistemine aktarılması da oldukça kolaydır (Wang, 2011; Geng & Bidanda, 2017).

2.3. Ayrıntılandırma - Parçalara Ayırma Ve Yüzey Ayarlamaları

Tersine mühendislikte, poligonlaştırma işlemi yapılmış bir yüzeye genellikle ince ayar yapılmaktadır. Bir üçgenin merkezi yüzeyden çok uzaktaysa ve/veya üçgen köşelerindeki yüzey normalleri arasındaki sapma çoksa, üçgen kendi içerisinde veya kenarları boyunca yeni üçgenlere bölünmektedir. Bazı tersine mühendislik yazılımları, örneğin, PolyWorks®, bağlantı noktalarının

çalışmasında birincil mesafe olarak maksimum mesafe parametresini kullanmaktadır. Poligonizasyon/poligonlaştırma/üçgenleştirme derecesi, ilgilenilen yüzeyin karmaşıklığına bağlıdır. Daha büyük bir eğriliğe sahip bir yüzeyin detaylarını daha iyi temsil edebilmesi için daha yüksek derecede poligonizasyon gerekmektedir (Wang, 2011).

2.4. CAD Modeli Oluşturma

Tersine mühendislik için veri bulutundan oluşturulan model, üretim için uygun bir CAD/CAM sistemine aktarılmaktadır. Ancak, modern CAD sistemlerinde bu modelleri algılamada hatalar oluşabilmektedir. Bu nedenle modeller doğrulama denilen işleme tabi tutulmaktadır. Model doğrulama işlemi, öncelikle kısıtlı optimizasyon işlemi ile başlar. İlk olarak, model üzerindeki olası kısıtlamalar, yarı otomatik olarak belirlenmeye çalışılır ve model üzerinde serbestlik derecesi azaltma işlemi uygulanır. İkincisi, basit bir parametre azaltımı ile temsil edilemeyen herhangi kısıtlamalar için ceza fonksiyonları kullanılır. Parça üzerindeki kısıtlamalar belirlendikten sonra, sürecin devamında bu kısıtlamaları ve başlangıç modelini temel alarak, üretilecek parça için yeni bir model oluşturulmaktadır. Böylece, nesneyi oluşturmak için gerekli parametre sayısını azaltan yeni bir model oluşturulur. Son olarak, kısıtlamalar ve verilere uyan en iyi modeli üretmek için zayıf bir arama algoritması kullanan bir optimizasyon işlemi kullanılır (Jamieson & Hacker, 1995; Germain vd, 1996; Lee vd, 2001).

2.5. Hızlı Prototipleme

Hızlı prototipleme teknikleri, tersine mühendislik çalışmalarında veya seri imalat ile üretilecek parçalar için seri imalata geçilmeden önce ortaya çıkabilecek hataları en aza indirmek için parçaların örneklerinin (prototip) çeşitli yöntemler ile üretilmesinde kullanılmaktadır. 3B yazıcı teknolojilerinin çok hızlı gelişimiyle birlikte, süreç de kısalmıştır. 3B baskı üretim materyali olarak ABS (Akrilonitril bütadien stiren), PLA (Poliaktik asit) ve Poliamid gibi polimerler kullanılır. Hızlı prototipleme tekniklerinin en yaygın olarak kullanılanları ve özellikleri aşağıda ki gibi sıralanabilir (Poligonmühendislik, 2020):

-FDM (Fused deposition modeling): Şerit halindeki plastik hammaddenin ekstrüzyon kafasına iletilmesi ve burada ısıtılarak eriyik hale getirilmesi ilk aşamadır. Damlalar halinde, bir tablaya katmanlar halinde parçanın şeklinin çizilmesi işlemidir.

- SLS (Selective laser sintering): Toz halinde bulunan plastik malzeme bilgisayar destekli üretim (CAM) yazılımı ile hareket eden lazer ışınıyla taranarak, malzemenin sinterlenerek katman oluşturması sağlanır.

- MJF (Multi Jet Fusion): HP'nin 2B yazıcılarda hızlı yazdırma için kullandığı patentli Multi Jet teknolojisini 3B yazıcılara taşımasıyla ortaya çıkmış olan bir yöntemdir. Çok hızlı üretim yapabilmektedir.

- SLA (Stereolithography): Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi (ultraviyole) lazer ışını vasıtasıyla belirli bölgelerinin kürleştirilmesi prensibiyle çalışan bir yöntemdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Yöntem

3.1.1. Tarama

Bu çalışmada, tersine mühendislik uygulaması ile diz altı ampütasyonu için bir prototip protez tasarımı ve imalatı yapılmıştır.

Tersine mühendislik uygulamasının ilk aşaması olan sayısallaştırma aşamasında veri toplama işlemi, "biçimli ışık tarayıcıları" olarak da adlandırılan FAROARM® Edge 2.7 üç boyutlu lazer tarama

TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMIYLA PROTEZ TASARIMI

ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3). Cihaz, temassız ölçüm olanağı (CMM) sağlamaktadır ve saniyede 45.000 nokta yakalama hızına sahiptir. Cihaz üzerinde 1 adet lazer tabancası bulunmakta olup, yapılan tarama üzerinden STL verileri alınabilmektedir. Cihazın ölçüm çapı 2,7 metredir (FaroArm, 2020; Naherco, 2020). Cihazın yaygın olarak kullanıldığı alanlar olarak;

- Çamur, kil, köpük gibi malzemelerden el ile yapılmış endüstriyel tasarım modellerinin sayısallaştırılması,
- Rakip ürün incelemeleri
- Sanat eserlerinin restorasyonu
- Diş, protez ve benzeri medikal uygulamaların sayısallaştırılarak üretilmesi
- CAD datası mevcut olmayan ürün, kalıp, aparat, fikstür gibi parçaların CAD datasını elde etmek için sayısallaştırılması
- Çok büyük boyutlu ürünlerin ölçümleri
- Kalıp ve aparatların kalite kontrolü
- Yüzey formlarının kontrolü
- Üretim esnasında veya sonradan oluşan çökme, eğilme gibi fiziksel hataların tespiti sayılabilir.



Şekil 3. FaroArm Edge 2.7 3B lazer tarama ölçüm cihazı

3.1.2. Yüzey Modelleme

STL üzerinden “Section Curve”, “Feature Curve” ve “3D Curve” gibi eğriler ile “Primitive” ya da “Freeform” yüzeyler doğrudan elde edilebilmektedir. Bu eğri ve yüzeyler, modelleme yapılırken doğrudan kullanılabilir veya oluşturulacak yeni eğri ve yüzeylere referans görevi de yapabilirler. Modelleme çalışmasında, SOLIDWORKS® CAD yazılımıyla, tarama sonuçları üzerinden gerekli poligon eğrileri çizilip, modelin sınırlarına yakın bir form yakalanmıştır. Oluşan eğri düzleminden istenilen yüzey geçişi sağlandıktan sonra, yüzeyin modellemesi tamamlanmış ve katı model elde edilmiştir. SOLIDWORKS® CAD yazılımı, tasarım, otomasyon ve simülasyondan doğrulama, işbirliği ve veri yönetimine kadar daha iyi ürünler tasarlamak için ihtiyaç duyulan özellikleri bir arada sunan ve basit, hızlı ve etkin şekilde 2D ve 3D katı modeller ortaya çıkarmak için kullanılan bir CAD yazılımıdır (Solidworks, 2020).

3.1.3. Protez Tasarımı

3.1.3.1 İç Tasarım

Yüzey modellemesi bittikten sonra oluşturulan modele uygun bir protez tasarımı yapılmıştır. Protezin tasarımında, CATIA programı ile temsili iç mekanizma tasarımı oluşturulmuştur. CATIA, tasarım süreçlerini kısaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla özellikle otomotiv sanayinde çok fazla kullanılan bir programdır. Tasarımların topolojisini ve geometrilerini düzeltebilme ve iyileştirebilme özellikleri sonucunda üretilen ürünlerin kalitesini artırmaya yönelik bir CAD programıdır. Mevcut CAD veri bileşenlerinin ve ürün tasarımının kalitesini arttırmaya yönelik modüllere sahip olan program aynı zamanda 3B baskıya gönderilecek olan tasarımların ve parçaların kalitesini arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır (Catia, 2020).

Protez, diz altı amputasyonu için tasarlanmıştır. Protezin iç tasarımı, 3 ana bölüm altında ele alınmıştır: Amputasyon bölgesi (güdük), kaval kemiği bölgesi ve ayak. Tasarımın ilk bölümü olan amputasyon bölgesi tasarımında, bireyin kendi vücut ölçülerinin taranmasıyla elde edilen ve protez ile entegre olan kısım tasarlanmıştır. Kaval bölgesi tasarımı için, basit bir yaylı sistem düşünülmüştür. Kişinin kendi ağırlığından gelen basma kuvvetini karşılaması amacıyla yaylı bir sistem düşünülmüştür. Ayak ve bilek bölgesi tasarımında protezin ayak ve bilek kısımlarının birlikte çalışırken, insan bileğine benzer şekilde hareket edebilmesi için bir küresel mafsal eklem yerine düşünülmüştür. Tarama ve ardından 3B yazıcıdan alınan ayak modeli eklenmiştir.

3.1.3.2 Dış Tasarım

İç mekanizmanın tamamlanmasının ardından, PolyWorks® programı kullanılarak yapılan iç tasarım üzerine, taranmış ve katı modeli elde edilmiş olan dış kısım giydirilmiştir. PolyWorks® programı 3B metroloji, tersine mühendislik ve saha etüdü için geliştirilmiş universal bir yazılımdır. Yazılımın özellikleri dijitalleştirilmiş prototip parça ve montajlarda, yüksek yoğunluklu nokta bulutlarını kullanarak deformasyonları hızlı bir şekilde belirlemek ve sorunları üretim sürecinin erken evrelerinde düzeltmek ve üretim sürecini ilk montajlanan ürünleri ölçerek onaylamak olarak sıralanabilir. Program sayesinde elde edilen nokta bulutu, yüksek hassasiyetli poligon modellere dönüştürülebilir ve geometrideki kusurlar, poligon özellikleri sayesinde yeniden tasarlanabilir. CAD yazılımında kolaylıkla düzenlenebilecek ve kontrol noktalarının ve yamaların sayısını en aza indirebilmek için mantıksal eğri ağları oluşturmak da programın özellikleri arasındadır (PolyWorks, 2020).

3.1.4. 3B Yazdırma İşlemleri

Çalışmanın hızlı prototipleme kısmında SLA yöntemi ile çalışan Roboze One 400 yazıcı kullanılmıştır. Yazıcı 100 µm işleme hassasiyeti ile 3 eksenli 350 mm ölçülerinde ve 12 farklı malzemeden prototip oluşturma imkanı sağlamaktadır. Şekil 4'de yazıcının resmi görülmektedir.



Şekil 4. 3B yazıcı

Taramanın ardından üretilecek prototipin tüm verileri Simplify3D® programı yardımıyla yazıcıda üretim için kullanılmıştır. Simplify3D® programı ile tasarımın son kontrolleri yapılarak, malzeme seçimi ve kullanılacak filamentin uzunluğu da tespit edilebilmektedir. Program, 3B modelleri ve tarama verilerini yazıcının anladığı talimatlara dönüştürmekte kullanılan bir programdır ve pek çok 3B yazıcıyla uyumlu olarak çalışmaktadır (Simplify3D, 2020).

3.2. Malzeme

3B yazıcıda malzeme olarak ABS (Akrilonitril bütadien stiren) kullanılmıştır. ABS yüksek dayanımlı, hafif ve rijit bir malzemedir. Ayrıca geri dönüşümlü olması da tercih sebeplerinden bir tanesidir.

4. SONUÇLAR

FAROARM® Edge 2.7 üç boyutlu lazer tarama ölçüm cihazı ile elde edilen taramanın resmi Şekil 6'da görülmektedir. İnsan bacağı üzerinden yaklaşık olarak 10 milyon nokta saptanmış olup daha iyi yüzey formu yakalamak için nokta sayısında %5 azaltma işlemi uygulanmıştır.

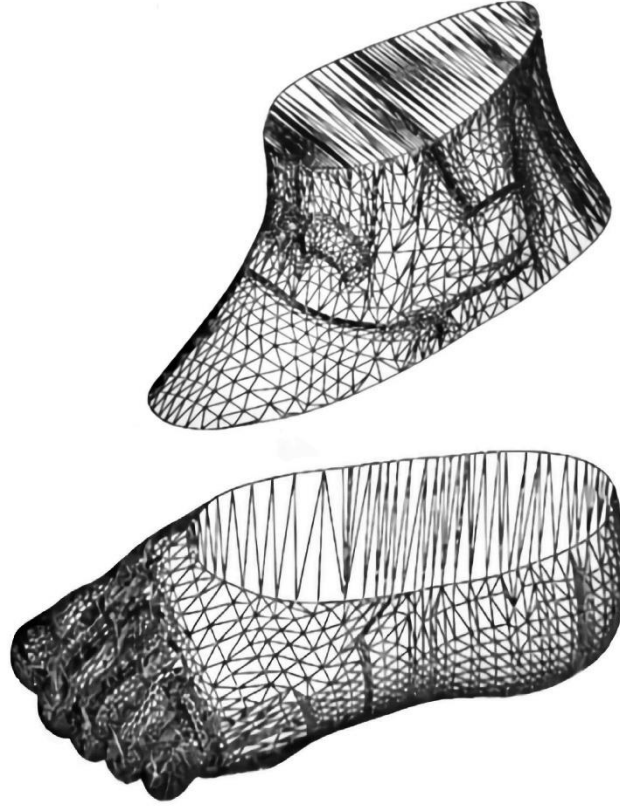
Çalışmanın 2.aşamasında, taranmış uzuv üzerinden sayısallaştırılmış modelin STL dosyası CAD programına aktarılmıştır. SOLIDWORKS® CAD yazılımıyla gerekli poligon eğrileri çizilip, bacağın sınırlarına yakın bir form yakalanmıştır. Oluşan eğri düzleminden istenen yüzey geçişini sağlandıktan sonra (Şekil 5), Şekil 6'da görülebileceği gibi yüzeye doğrulama işlemi yapılmış ve ardından yüzeyin meshleme (ağ modeli oluşturma) işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 5. FAROARM® Edge 2.7 üç boyutlu lazer tarama ölçüm cihazı ile elde edilen tarama

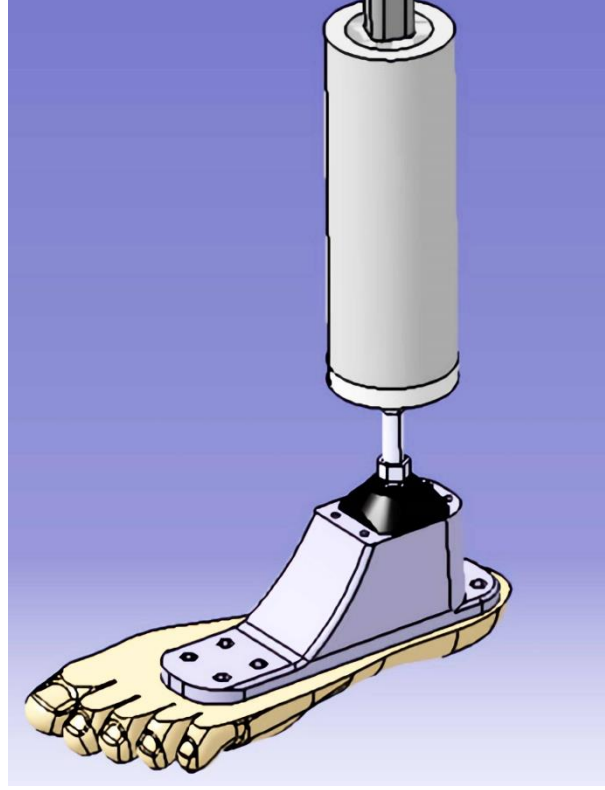


Şekil 6. SOLIDWORKS® CAD yazılımıyla elde edilen, taranmış bacağın sınırlarına yakın form



Şekil 7. SOLIDWORKS® CAD yazılımıyla elde edilmiş meshleme işlemi

Yüzey modellemesi tamamlandıktan sonra, CATIA programı yardımıyla oluşturulan modele uygun bir protez tasarımı yapılmıştır. Şekil 8’de CATIA programıyla oluşturulmuş mekanizma görülmektedir. Ayak ve bilek bölgesi mekanizması, diz altı amputasyonu geçirmiş bir hasta için dikkatli bir şekilde oluşturulmuştur. Tasarlanan modele, modellenmiş yüzey Şekil 9’da ki gibi giydirilmiştir.



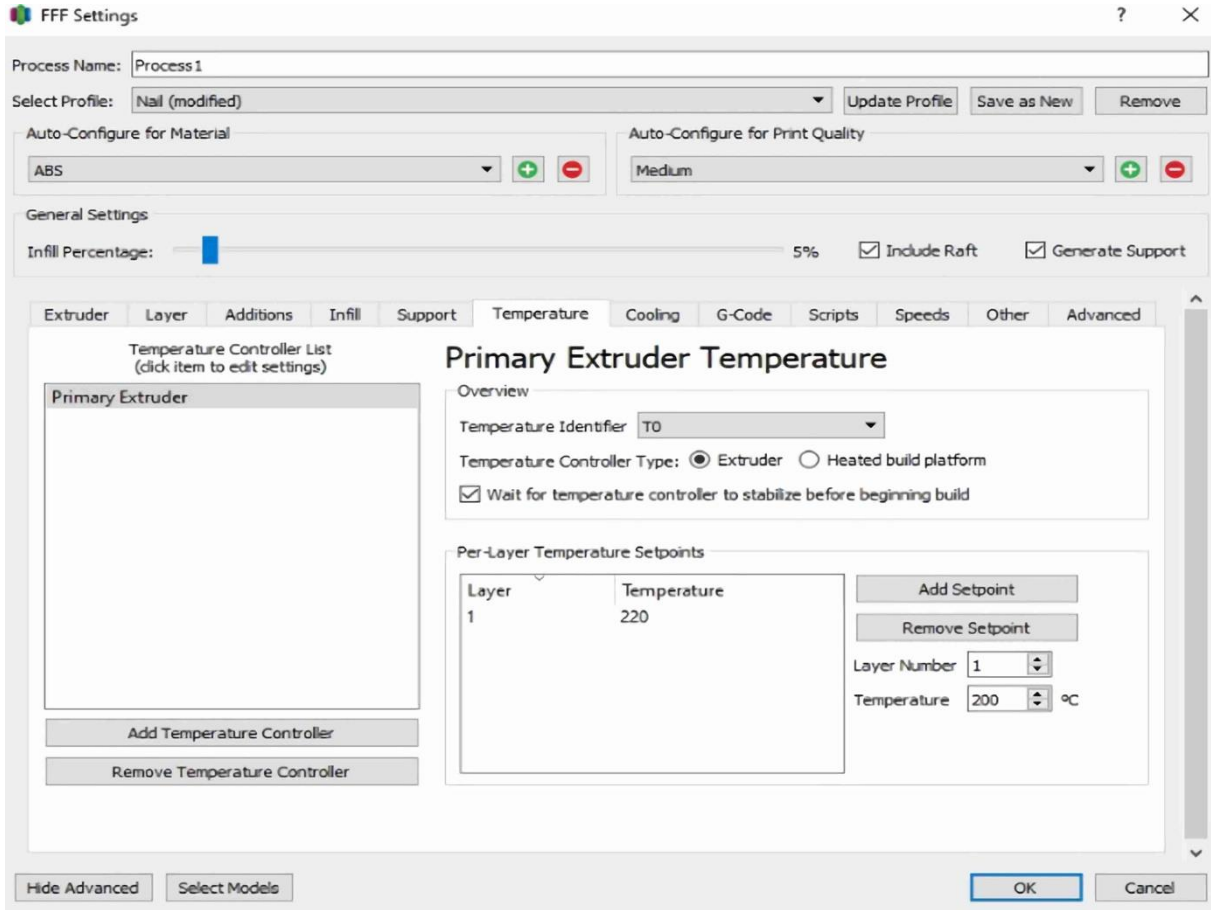
Şekil 8. CATIA programıyla oluşturulmuş protez tasarımı



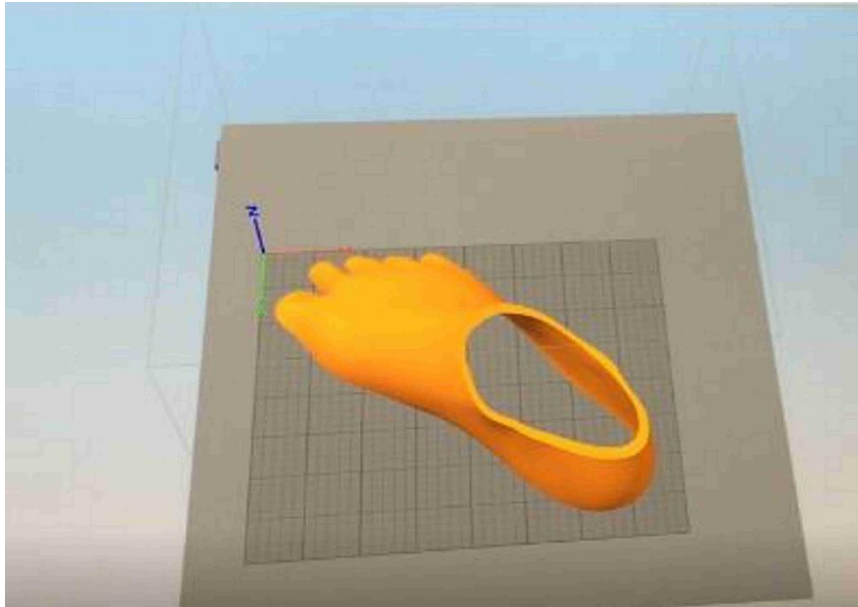
Şekil 9. CATIA programında oluşturulmuş tasarıma yüzey modelinin giydirilmesi

Hızlı prototipleme yapabilmek için, SLA yöntemi ile Roboze One 400 makinası kullanılmıştır. Taranıp işlenen tüm model verileri Simplify3D® programı ile basım öncesi model basım ayarlama işlemi yapılmış (Şekil 10), cihazın tablasına en uygun yerleşim planı çıkarılmıştır (Şekil 11). Tasarımın son kontrolleri yapıldıktan sonra, 3B yazıcı ile üretilecek olan modeller için gerekli malzeme seçimi ve filament uzunluğu hesaplanmıştır.

TERSİNE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMIYLA PROTEZ TASARIMI



Şekil 10. 3B yazıcı ayarları



Şekil 11. 3B modeli tabla ölçülerinde ayarlama

Simplify3D® programı ile 3B yazıcı kullanılarak, CATIA programında tasarlanmış protez parçaları tek tek üretilmiştir. Şekil 12’de ayak alt kısım, Şekil 13’de ayak üst kısım, Şekil 14’de bilek alt kısım,



Şekil 12. Ayak alt kısım



Şekil 13. Ayak üst kısım



Şekil 14. Bilek alt kısım



Şekil 15. Ayak ve bilek kısımlarının montajlı hali

5. TARTIŞMA

Bireye özel çalışmalar ve ürünler, özellikle sağlık sektöründe büyük önem taşımaktadır. Vücut parçalarının yerine kullanılan protez ve vücudu destekleyici olarak kullanılan ortez üretiminde bu teknolojinin bireyin hayatına getirebileceği kolaylık tartışılmazdır.

Bu çalışmada, tersine mühendislik uygulamaları kullanılarak bir protez tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. İnsan bacağı üzerinden 3B tarama ile alınan veriler işlenerek, 3B yazıcı ile kolayca üretilebilecek ve monte edilebilecek bir tasarım oluşturulmuştur. İşlem basamakları özetlenecek olursa, sırasıyla;

- Tersine mühendislik uygulamasının ilk aşaması olan sayısallaştırma aşamasında veri toplama işlemi, "biçimli ışık tarayıcıları" olarak da adlandırılan FAROARM® Edge 2.7 üç boyutlu lazer tarama ölçüm cihazı ile yapılmıştır.
- Modelleme çalışmasında, SOLIDWORKS® CAD yazılımıyla, tarama sonuçları üzerinden gerekli poligon eğrileri çizilip, modelin sınırlarına yakın bir form yakalanmıştır.
- Oluşturulan modele uygun bir protez tasarımı yapılmıştır. Protezin tasarımında, CATIA programı ile temsili iç mekanizma tasarımı oluşturulmuştur.
- PolyWorks® programı kullanılarak yapılan iç tasarım üzerine, taranmış ve katı modeli elde edilmiş olan dış kısım giydirilmiştir.
- Hızlı prototipleme için SLA yöntemi ile çalışan Roboze One 400 yazıcı kullanılmıştır.
- 3B yazıcıda malzeme olarak ABS kullanılmıştır.
- Yazıcıdan elde edilen parçalar, monte edilerek protez imalatı tamamlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde çok büyük katkı sağlayan başta Galtek Kimya Metal Plastik Makine San. ve Tic. Ltd ve 3D Models firmaları olmak üzere Mustafa Göktepe, Kıvanç Agur, Atamer Özalp ve Deniz Yardım'a çok teşekkür ederiz.

6. KAYNAKÇA

Bidanda, B., Motavalli, S., & Harding, K. (1991). Reverse engineering: an evaluation of prospective non-contact technologies and applications in manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 4(3), 145-156.

Boender, E. (1991). A survey of intersection algorithms for curved surfaces. *Computers & graphics*, 15(1), 109-115.

Bradley, C., & Chan, V. (2001). A complementary sensor approach to reverse engineering. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 123(1), 74-82.

Carbone, V., Carocci, M., Savio, E., Sansoni, G., & De Chiffre, L. (2001). Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(4), 263-271.

CATIA. Retrieved 06.02.2020. Cadem website: https://cadem.com.tr/tr/media/urunler/catia?gclid=Cj0KCQiA7OnxBRCNARIsAIW53B_MCbhT8DSLw11A0BuRePbBJe-SsGy9hkunTBfWhf9f7ehadDc3gGgaAp08EALw_wcB

Cha, B. K., Lee, J. Y., Jost-Brinkmann, P. G., & Yoshida, N. (2007). Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *The European Journal of Orthodontics*, 29(4), 325-331.

Chan, V. H., Bradley, C., & Vickers, G. W. (2001). A multi-sensor approach to automating co-ordinate measuring machine-based reverse engineering. *Computers in Industry*, 44(2), 105-115.

Chivate, P. N., & Jablokow, A. G. (1995). Review of surface representations and fitting for reverse engineering. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 8(3), 193-204.

Çilli, M. (2007). İnsan Hareketlerinin Modellenmesi ve Benzeşiminde Temel Bileşen Analizi Yönteminin Kullanılması. Ankara: Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Dussa, C. U., Hieu, L. C., Singhal, K., & Sloten, J. V. (2005). Influence of femoral component placement on the load distribution on the neck in surface replacement arthroplasty. In proceedings of XXIII SICOT. In SIROT Triennial World Congress.

Erden, O. (2018). İnsan Kolu Humerus Kemiğinde Basma Geriliminin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(2), 43-47.

FaroArm Özellikleri - FARO Technologies. Retrieved 06.02.2020. Faro Technologies website: <https://www.faro.com/tr-tr/urunler/3d-manufacturing/faroarm/features/>

Germain, H. D. S., Stark, S. R., Thompson, W. B., & Henderson, T. C. (1996, February). Constraint optimization and feature-based model construction for reverse engineering. In Proceedings of the ARPA Image Understanding Workshop.

Geng, Z., & Bidanda, B. (2017). Review of reverse engineering systems—current state of the art. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(2), 161-172.

Hieu, L. C., Sloten, J. V., Hung, L. T., Khanh, L., Soe, S., Zlatov, N., ... & Trung, P. D. (2010). Medical Reverse Engineering Applications and Methods. Proceedings of International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development – MECAHITECH'10, vol. 2.

Hieu, L. C., Bohez, E., Sloten, J. V., Hung, L. T., Khanh, L., Zlatov, N., & Trung, P. D. (2010). Integrated approaches for personalised cranio-maxillofacial implant design and manufacturing. In *The Third International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam* (pp. 119-122). Springer, Berlin, Heidelberg.

Jamieson, R., & Hacker, H. (1995). Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*.

Le, C., Jos, V. S., Le, T. H., Lam, K., Soe, S., Zlatov, N., ... & Pham, D. T. (2010). Medical reverse engineering applications and methods.

Lee, K. H., Woo, H., & Suk, T. (2001). Data reduction methods for reverse engineering. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 17(10), 735-743.

Liu, J., Dong, G. P., & Fan, Y. B. (2016). Personalized ring design and rapid manufacturing based on reverse engineering and 3D printing. In *Applied mechanics and materials* (Vol. 851, pp. 599-602). Trans Tech Publications Ltd.

Lupi, A., & Sant, Z. (2007). Reverse engineering applied to a lumbar vertebra. *Malta Medical Journal* Volume 20 Issue 04 December 2007.

Milusheva, S. M., Tosheva, E. Y., Hieu, L. C., Kouzmanov, L. V., Zlatov, N., & Toshev, Y. E. (2006). Personalised ankle-foot orthoses design based on reverse engineering. In *Intelligent Production Machines and Systems* (pp. 253-257). Elsevier Science Ltd.

Naherco - FaroArm Edge Home. Retrieved 06.20.2020. Naherco website: <http://www.naherco.com/faro-arm-edge.html>

Önçağ, A. Ç., Tekcan, Ç., & Özden, H. (2018). Mekanik parçaların tersine mühendislik ile modellenmesinin değerlendirilmesi ve bir uygulama. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 43-49.

Park, J. J., Kwon, K., & Cho, N. (2006). Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2380.

Peggs, G. N., Lewis, A. J., & Oldfield, S. (1999). Design for a compact high-accuracy CMM. *Cirp Annals*, 48(1), 417-420.

Poligonmuhendislik. Retrieved 06.02.2020. Poligon mühendislik website: <https://www.poligonmuhendislik.com/hizmetlerimiz/uretim/hizli-prototipleme>

PolyWorks- software-for-laser-tracker-systems. Retrieved 06.02.2020. Hexagon website: <https://www.hexagonmi.com/tr-TR/products/software/software-for-laser-tracker-systems/polyworksreg>

Sanghee, K., & Bracewell Rob, H. (2007). Improving design reuse using context. *Guidelines for a Decision Support Method Adapted to NPD Processes*.

Simplify3D Software. Retrieved 06.02.2020. Simplify3D software website: <https://www.simplify3d.com/>

Śladek, J., Błaszczuk, P. M., Kupiec, M., & Sitnik, R. (2011). The hybrid contact–optical coordinate measuring system. *Measurement*, 44(3), 503-510.

Solidworks. Retrieved 06.02.2020. Solidworks website: <https://www.solidworks.com/>

STL nedir ve nasıl oluşturulur?. Retrieved 06.02.2020. STL indir website: <https://stlindir.com/stl-nedir-ve-nasil-olusturulur-2>

STL Nedir? Nasıl Elde Edilir? - Tridi. Retrieved 06.02.2020. Tridi website: <https://www.tridi.co/blog/stl-nedir-nasil-elde-edilir>

US Army, (2006). *Reverse Engineering Military Handbook MIL-HDBK-115A(ARMY)*.

Varady, T., Martin, R. R., & Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric models—an introduction. *Computer-aided design*, 29(4), 255-268.

Wang, W. (2011). *Reverse engineering: Technology of reinvention*. CRC Press.

Xu, X. (2009). *Integrating advanced computer-aided design, manufacturing, and numerical control: principles and implementations*. New York: Information Science Reference.

Ye, X., Liu, H., Chen, L., Chen, Z., Pan, X., & Zhang, S. (2008). Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-aided design*, 40(7), 812-827.

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

Elif Malyer *

* *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu MYO, Turgutlu, Manisa*

emalyer@gmail.com

* *Sorumlu Yazar*

1. GİRİŞ

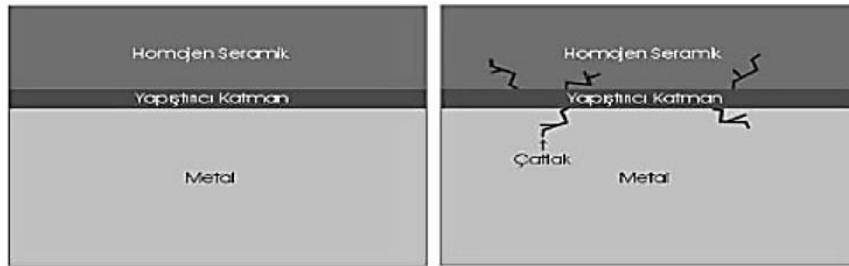
Gelişen teknoloji ile üretilen bir parçanın birbirinden farklı yüzeyleri, ince kesitli bile olsalar, farklı çalışma koşulları altında çalışmak zorunda kalabilmekte ve hatta bu ürünlerden yüksek sıcaklık ve yükleme şartlarında yüksek dayanım özellikleri gösterebilmesi dahası bu özelliklerini koruması beklenmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) bu konuda çözüm olabilecek özellikler taşımaktadırlar. Bu malzemeler aşırı termal ve mekanik yükler altında geleneksel malzemelere kıyasla çok iyi özellik gösterirler. Bu malzemelerin doğalarından dolayı deformasyon sertleşmesi üsteli, aşınma dayanımı, sertliği, akma dayanımı, elastikiyet modülü gibi mekanik özellikleri ile içyapı özellikleri malzeme kesiti boyunca değişebilen yöne bağımlı davranış göstermektedir (Rathee, Maheshwari, Siddiquee ve Sirivastava, 2017: 351). Bu değişim belirli kriterler esas alınarak bir matematiksel fonksiyona bağlıdır. Değişimin kontrollü olması bu malzemelerin üretimini zorlaştırmaktadır. Bu amaçla bazı kaplama yöntemleri ve toz metalürjisi, savurma döküm yöntemi ve hatta Seçimli Lazer Ergitme (Selective Laser Melting/SLM) gibi eklemeli üretim yöntemleri de kullanılmaktadır. Kaplama yöntemleri sadece FDM'in matris malzeme üzerine kaplama olarak üretilmesine izin verirken, savurma döküm tekniği ise sadece sürekli derecelendirilmiş FDM'in üretimi için kullanılabilir. Eklemeli imalat yöntemleri de hala maliyeti yüksek ve gelişim aşamasındaki teknikler olarak karşımıza çıkmaktadır. 2000'li yılların başında geliştirilen Sürtünme Karıştırma Yöntemi (SKY), yatırım maliyetinin düşük olması, işlem parametrelerinin daha kolay kontrol edilebilmesi ve çevre dostu olması nedeniyle belirtilen malzemelerin gerek kütle olarak gerekse kaplama olarak ya da sürekli ve süreksiz derecelendirilmiş FDM'in üretilmesinde alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yöntemde takviye malzemesinin partikülleri ana matris malzeme üzerine açılan deliklere ya da kanallara gömülerek işleme başlanır. Diğer bir yöntem ise ana matrise bırakılan partiküllerin üzerine kapak görevi göreceğ bir plakanın kapatılarak SKY'nin uygulanması şeklindedir. İşlem tamamen Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ile benzerlik göstermektedir. SKK'nda kullanılabilecek bir takım önceden hazırlanmış matris malzemeye istenilen nüfuz derinliği kadar daldırılır. Takım kendi etrafında dönerken aynı zamanda malzeme içerisinde belirlenen bir takım yoluna göre ilerler böylece meydana gelen sürtünme ısı ve lokal plastik deformasyon yardımı ile ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ısınan malzeme, takımın da yardımıyla akmaya başlar ve bu durum takviye elemanı ile matris malzemenin karışmasını sağlar. Yöntem katı hal yöntemlerinin tüm avantajlarına sahiptir. Ayrıca SKY ile elde edilecek ürünün içyapı ve mekanik özellikleri tamamen işlem parametrelerinden etkilenmektedir.

Gerek FDM'in gerekse SKY'nin kısa geçmişi üzerlerinde çalışılması gereken birçok alanın olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca gelişen teknoloji ile değişen ihtiyaçlar hem FDM'i hem de SKY'ni ilgi odağı haline getirmektedir. Bu bölümde, literatürde konu ile ilgili çok az çalışma bulunan, FDM'lerin SKY ile üretilebilirliği incelenmiştir.

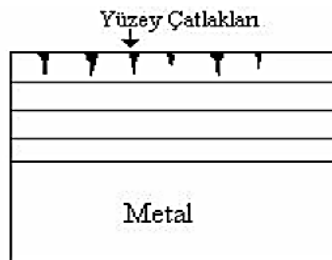
2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

2.1. Tanım

Birçok hafif kompozit malzeme, yüksek dayanım/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranları nedeniyle başta havacılık endüstrisi olmak üzere pek çok mühendislik uygulamasında başarıyla kullanılmaktadır. Fakat yüksek sıcaklığın söz konusu olduğu çalışma ortamlarında geleneksel kompozit malzemeler kullanıma uygun değildir. Çelik malzemeler de genel olarak mükemmel tokluk ve dayanım özelliklerinden dolayı mühendislik alanlarının hemen hemen tümünde yüz yıllardır kullanılmaktadırlar. Yüksek sıcaklıkta çalışma gerektiren şartlarda çelik malzemelerin de geleneksel kompozit malzemeler gibi dayanım özellikleri düşmektedir. Diğer yandan seramik malzemelerin ısıl dirençleri yüksektir fakat düşük tokluk özellikleri nedeniyle kullanım alanları maalesef sınırlıdır (Shen, 2016:1). Klasik kaplama teknolojileri bu probleme çözüm niteliğindedir. Metal malzeme, yüksek sıcaklığa dayanımlı seramik malzeme ile kaplanarak ısıl bariyer oluşturulur ve yeni oluşturulan sistem yüksek sıcaklığın neden olduğu olumsuzluklardan korunur (Kaman ve Cetişli, 2011: 27); (Karahalil, 2012: 1). Bu tür uygulamalar özellikle türbinlerde verimi arttırmak ve yakıt ekonomisi sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılır ve kaplanan malzemenin üzerine tek katlı homojen kaplama olarak uygulanır (Yıldırım, 20014: 69). Ancak bu durum yeni bazı problemleri de beraberinde getirir. Her ne kadar kaplanan malzeme yüksek genleşme göstermeyen metal malzemelerden seçilse de seramik ve metal malzemeler farklı ısıl genleşme katsayılarına sahiptir ve bu durum, Şekil 1’de şematize edildiği gibi bağlanma ara yüzeyinde çatlak oluşumu ve hatta kırılmalar ile sonuçlanacak ısıl gerilmelere neden olur (Kaman ve Cetişli, 2011: 27); (Karahalil, 2012: 1); (Akbaş, 2018: 70); (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Aksoy ve Şenocak, 2011: 105). Benzer problemler kaplanan ve kaplama malzemelerinin uyumsuz fiziksel özelliklerinden dolayı mekanik yükler altında da gerçekleşebilir (Topçu, Taşgetiren ve Uluköy, 2010: 142). Ayrıca Şekil 2’de görüldüğü üzere, kenar çatlakları gözlenebilir ve bu çatlaklar kaplama malzemesinin üst yüzeyinde ve yüzeyin normalinde konumlanırlar (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1). Dahası seramik malzemelerin kırılma özelliği ve metal malzemenin yüksek sıcaklıklarda aşınma ile oksitlenmeye maruz kalması, metal-seramik kompozitlerin katmanlar arası geçişte malzeme özelliklerinin süreksiz olması nedeniyle ihtiyaçları karşılayamaması ve benzer problemlerin sadece yüksek sıcaklıklarda değil aynı zamanda aşınma, yorulma ve kırılma şartlarında da söz konusu olması belirtilen problemlerin çözümü için yeni arayışlara sebep olmuştur (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Apatay, Serkan, Güler ve Gülgeç, 2010: 611); (Apatay, 2010: 1).

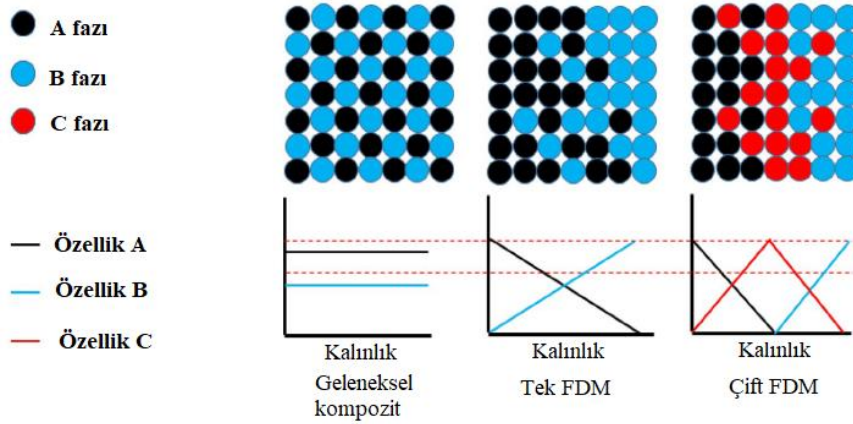


Şekil 1: Klasik kaplama yöntemlerinde meydana gelen çatlaklar (Karahalil, 2012: 1)



Şekil 2: Klasik kaplamada oluşan kenar çatlakları (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 2)

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM, Functionally Graded Materials-FGM), yukarıda belirtilen olumsuzlukların çözüm arayışında kompozit malzemelerin bir alt tipi olarak ortaya çıkmıştır (Uluköy, 2016: 122); (Vatanabe, Rubio ve Silva, 2014: 261). FDM’de yapı içerisinde, metal-metal, metal-seramik, seramik-seramik, seramik- polimer gibi en az iki farklı malzemenin oranları, malzeme kalınlığı boyunca bir fonksiyona bağlı olarak değişir (Kaman ve Cetişli, 2011: 27); (Yıldırım, 20014: 69); (Uluköy, 2016: 122); (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378); (Pradhan ve Chakraverty, 2019: 1); (Ersan, 2008: 1). Bu fonksiyon, üssel, lineer olabildiği gibi kuvvet kuralına göre de türetilir ve malzemenin Young modülü, akma ve çekme dayanımları ile deformasyon sertleşmesi üstelini etkiler (Uluköy, 2016: 122). A fazı, ana faz olmak üzere FDM’de, B fazı oranı, malzemenin tabanında %0’dır. Bu oransal değişim, B-fazı oranını, malzemenin üst yüzeyinde %100 olana kadar belirlenen fonksiyona bağlı olarak değişir (Kaman ve Cetişli, 2011: 27); (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Apatay, 2010: 1). Bazen bu değişim malzeme kalınlığı değil genişliği boyunca oluşturulmak istenebilir. Dolayısıyla yeni ürünün farklı noktalarında farklı malzeme özellikleri elde edilmiş olur ve hatta bu özellik değişimi malzeme genişliği ya da kalınlığı boyunca homojendir. Böylece klasik kaplama yöntemleri ile geleneksel kompozitlerde karşılaşılan malzeme uyumsuzluklarından kaynaklanan sorunlar azaltılmış olur (Uluköy, 2016: 122). Şekil 3’te geleneksel kompozitlerle tek ve çift FDM’de faz dağılımı ve buna bağlı özellik değişimi görülmektedir.

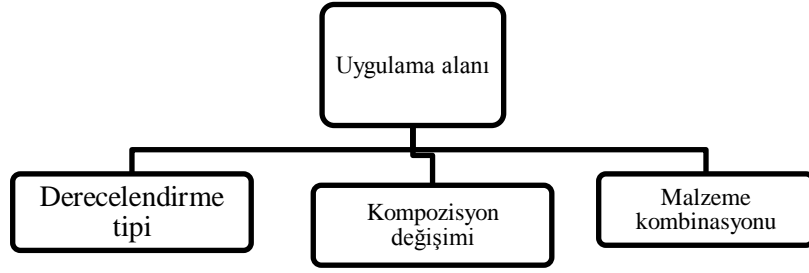


Şekil 3: Geleneksel kompozitler ve FDM’de özelliklerin değişimi (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378)

FDM, ilk olarak bir malzemenin, çalışma şartlarından dolayı, her iki yüzeyinin farklı ortamlarda ve yükler altında çalışmaya zorlandığı koşullar için üretilmişlerdir (Shen, 2016:1). 1984 yılında, Japonya’da bir uzay mekiği projesi kapsamında üretilen ilk fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, yaklaşık 10 mm kalınlığında ve iki yüzeyinin çalışma sıcaklıkları arasındaki farkın 1000°C olduğu şartlar için ısı bariyer malzemesi olarak tasarlanmıştır (Akbaş, 2018: 70); (Apatay, 2010: 1); (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378); (Pradhan ve Chakraverty, 2019: 1); (Baştürk, 2019: 464); (Chakraverty ve Pradhan, 2016: 7); (Sueri., 2015: 1); (Mahamood, Akinlabi, Shukla ve Pityana, 2012: 1); (Maalawi, 2018: 158); (Zhang, Khan, Guo, Shi, Zhong ve Zhang, 2019:1); (Khan, Zhang ve Akram, 2019:1).

2.2. FDM’in Sınıflandırılması

FDM, kullanım alanları, derecelendirme tipi, kompozisyon, malzeme kombinasyonları gibi birçok kritere göre sınıflandırılabilirler (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310). Şekil 4’te FDM’in genel sınıflandırılması yapılmıştır.



Şekil 4: FDM'in sınıflandırılması (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310)

FDM, geniş kullanım alanına sahiptir. Malzemenin farklı kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Havacılık/uzay endüstrisi:** Bu malzemelerin geliştirilmesinin arkasındaki ilk ihtiyaçtır. Uzay mekiği malzemesi olarak kullanılabilirler çünkü uzaya girildiğinde son derece yüksek sıcaklıklarla karşılaşılır. Böyle zor şartlarda FDM termal bariyer malzemesi olarak oldukça iyi dayanırlar (Karahalil, 2012: 1) ;(Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310); (Öktem, 2014: 111). Ayrıca roket başlığı, ısı eşanjör panelleri, motor parçaları, rüzgar tüneli kanatları, uzay aracı kafes yapı reflektörleri, güneş panelleri, kamera muhafazası, türbin tekerlekleri, kanatlar, döner fırlatıcılar, helikopter parçaları vb. gibi parçaları üretiminde de FDM'den yararlanılır (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7).
- **Endüstriyel malzemeler:** Kesici takımların üretimi bu gruba önemli örneklerden biridir. Talaş kaldırma işleminde yüksek bölgesel ve titreşimli gerilmeler söz konusudur ve bu durum yüksek miktarlarda ısı oluşumuna neden olur. Ekonomik kesme şartları, optimum kesme hızı ve uzatılmış takım ömrü gibi özellikler nedeniyle bu alanda kullanılırlar (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310). Ayrıca basınçlı kaplar, yakıt depoları, rüzgar türbinlerinin kanatları, elektrik motorları, laptop çantaları, yangın söndürme tipleri, MRI tarayıcıların kriyojenik tüpleri, tekerlekli sandalyeler, gözlük çerçeveleri, tripodlar, müzik aletleri, yüksek basınçlı hidrolik boruları, vinç parçaları, kasklar, potolar ve kirişler, dişliler ve rulmanlar gibi makine elemanları, vb. (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1); (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7); (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310).
- **Biyomedikal malzemeler:** Biyomedikal FDM tekniğinin diğer bir uygulama alanıdır. FDM, implant malzemesi olarak kullanılabilirler. Kırılmaların iyileşmesinde kemik destek plakası olarak, diş implantı, omurga diski, diz implantı ve kalça protezi kaplaması, kalça implantları, kalp kapakçıkları olarak FDM kullanılmaktadır. Özellikle diş implantı uygulamasında HAP-Ti FDM kullanılarak malzeme içerisinde farklı noktalarda farklı elastikiyet modülleri elde edilebilir. Bu fark biyo uyumluluğu ve implant ömrünü artırır. (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7); (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310). FDM ile metalik alaşımlar gözenekli yapıda üretilebildiği için bu malzemeler biyo-mühendislik uygulamalarına uygundur.
- **Otomotiv endüstrisi:** Yanma odaları (SiC-SiC), motor silindir gömlekleri (Al-SiC), dizel motor pistonları (SiCw/Al-alloy), fren rotoru, yaprak yaylar (E-glass/epoksi), tahrik milleri (Al-C), motosiklet tahrik dişlileri, kasnaklar, tork çevrim reaktörleri, amortisörler (SiCp/Al alloy), radyatör uç kapakları otomotiv endüstrisinde FDM kullanıldığı ürünlerdir (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7).
- **Denizaltılar:** FDM teknolojisi, denizaltı üretiminde kullanılan bazı parçaların imalatında da kullanılmaktadır. Bu parçalardan bazıları, tahrik milleri, silindirik basınçlı gövdeler, kompozit boru sistemleri, şamandıralar, tekne gövdeleri şeklinde sıralanabilir (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7).
- **Spor malzemeleri:** raketler ve yarış bisikletlerinin çerçevesi yine bu malzemelerden imal edilmektedir (Cahkraverty ve Pradhan, 2016: 7).

- Optik ve optoelektronik: FDM'in kullanım alanı bulunduğu diğer bir sektördür. Bu yöntemle farklı refraktif indekse ve farklı optik dalga yayımı ve absorpsiyon özelliklerine sahip cam fiber lensler üretilebilir (Parihar, Setti ve Sahu, 2018: 310).

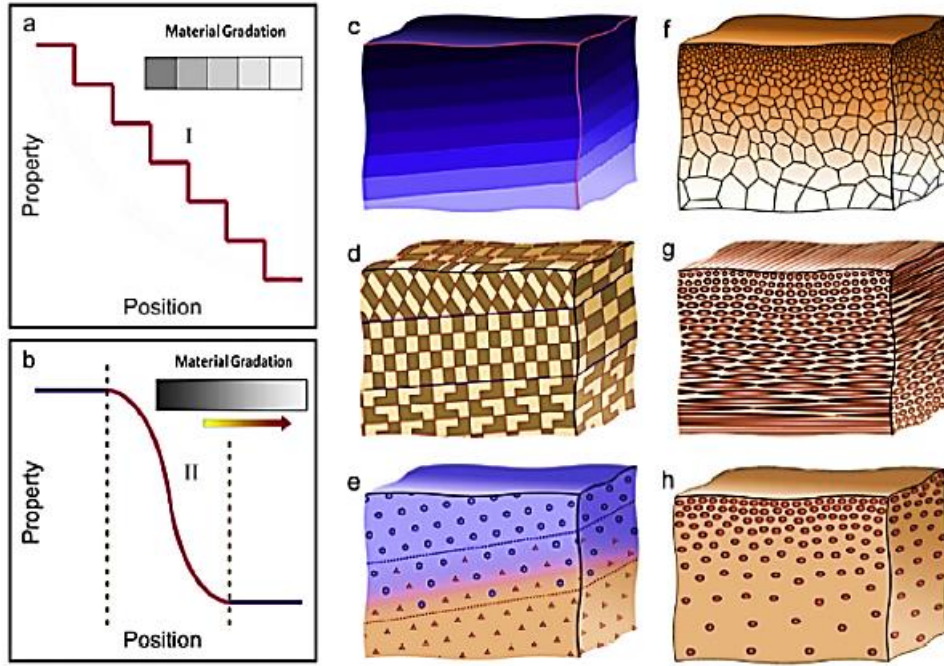
FDM derecelendirme yapısına göre en genel hali ile sürekli ve süreksiz derecelendirmiş FDM olarak iki sınıfta incelenebilir (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378); (Ağca ve Akar, 2017: 121) Süreksiz derecelendirilmiş FDM ise kendi arasında paçalı dercelendirilmiş, kompozisyona göre derecelendirilmiş ve yönelime göre derecelendirilmiş FDM olarak üç gruba ayrılırlar (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378). Derecelendirme tipine göre FDM'in yapısı Şekil 5'te görülmektedir. Süreksiz derecelendirilmiş FDM, yapı içerisinde termomekanik olarak birbirinden farklı tabakalar bulunduran malzemelerdir. Sürekli derecelendirilmiş FDM'de ise yukarıda da belirtildiği gibi malzemenin tabanında %0 olan B-fazı oranı üst yüzeyinde %100'dür. Bu şartlarda sürekli derecelendirilmiş tiplerin, süreksiz olanlara kıyasla iki avantajından bahsedilebilir: (i) fazlar arasındaki bağlanma, malzeme uyumluluğu sebebiyle daha iyidir, (ii) malzeme özelliklerinin dağılımı homojendir ve bu nedenle ara katmanlarda düşük gerilme konsantrasyonu elde edilir. Özel uygulamalar ve laboratuvar şartları hariç, tüm derecelendirme tipleri genellikle tek boyutludur yani iki fazlı üretilirler. Üç ve daha fazla faz içeren derecelendirmeler, diğerlerine göre daha kompleks üretim sistemleri gerektirdiği için kısıtlı uygulama alanlarına sahiptirler (Alagöz, Güleç ve Konez: 2004: 1). Derecelendirme tipine göre ise kompozisyon göre derecelendirilmiş, iç yapısına göre derecelendirilmiş ve poroziteye göre derecelendirilmiş FDM şeklinde bir sınıflandırma yapmak mümkündür (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378). Şekil 6'da derecelendirme tipine göre FDM verilmiştir.

Adı geçen malzemeler kompozisyon değişimine göre ise üç farklı tipten bahsetmek mümkündür. Bunlardan ilk tüm malzemenin belirtilen yöntemle üretildiği malzemelerdir. Diğerinde ise yöntem kaplama olarak kullanılır (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378). Üçüncü tipte ise FDM'in kaplama geçiş malzemesi olarak kullanılmaktadır (Kaman ve Cetişli, 2011: 27); (Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014: 1291).

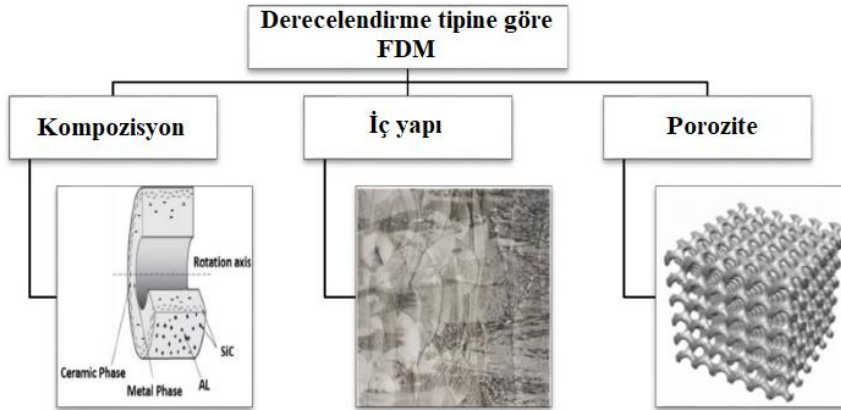
Malzeme kombinasyonuna göre sınıflandırılmış FDM ise örnekleriyle birlikte Şekil 7'da verilmiştir.

2.3. FDM'in Üretilmesi

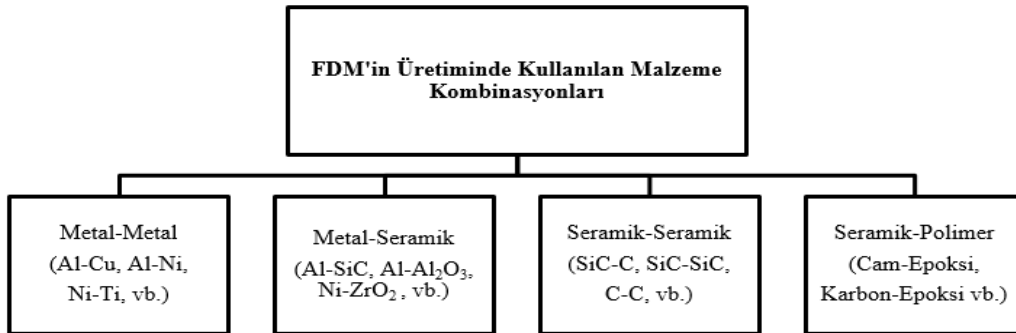
FDM'in üretiminde toz metalürjisinden eklemeli imalata kadar birçok teknik kullanılmaktadır. Özellikle FDM kaplama yöntemi için sıklıkla özellikle iyi bir içi yapı elde etmek amacıyla Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapour Deposition-CVD), Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapour Deposition-PVD) gibi Buhar Biriktirme Yöntemleri kullanılmaktadır. Sürekli derecelendirilmiş ve partikül takviyeli FDM'in imalatına izin veren, üretim yönteminin kısmen kolay ve ekonomik olması nedeniyle tercih edilen santrifüj ya da diğer adıyla savurma döküm yöntemi bu yöntemlerden biridir (Ağca ve Akar, 2017: 121). Diğer yaygın kullanılan yöntem ise metal veya seramik tozlarını bir kalıpta şekillendirilmesi ve devamında şekillendirme sırasında ya da sonrasında ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta sinterlenmesi süreci olan toz metalürjisi yöntemidir (Udupa, Rao ve Gangadharan, 2014: 1291). FDM'in üretiminde, çok genel olarak elektrik arkı, alev veya plazma ile ergitilmiş toz ya da tel kaplama malzemesinin partiküllerinin püskürtme gazı yardımıyla altlık malzemeye yapışması olarak tanımlanabilecek termal sprey kaplama yöntemleri de tercih edilmektedir ve bu yöntem de yine PVD ve CVD yöntemleri gibi sadece FDM kaplama işlemleri için kullanılmaktadır (Gökçe, Fındık ve Kurt, 2017: 21). Şekil 8'de FDM'in üretimi için sıklıkla kullanılan yöntemler özetlenmektedir.



Şekil 5: Derecelendirme yapısına göre fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (a-tabakalı; b-devamlı; c,f-kompozisyona göre; d,g-yönelime göre; e,h- parçalı derecelendirilmiş FDM) (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378).



Şekil 6: Derecelendirme tipine göre fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378).

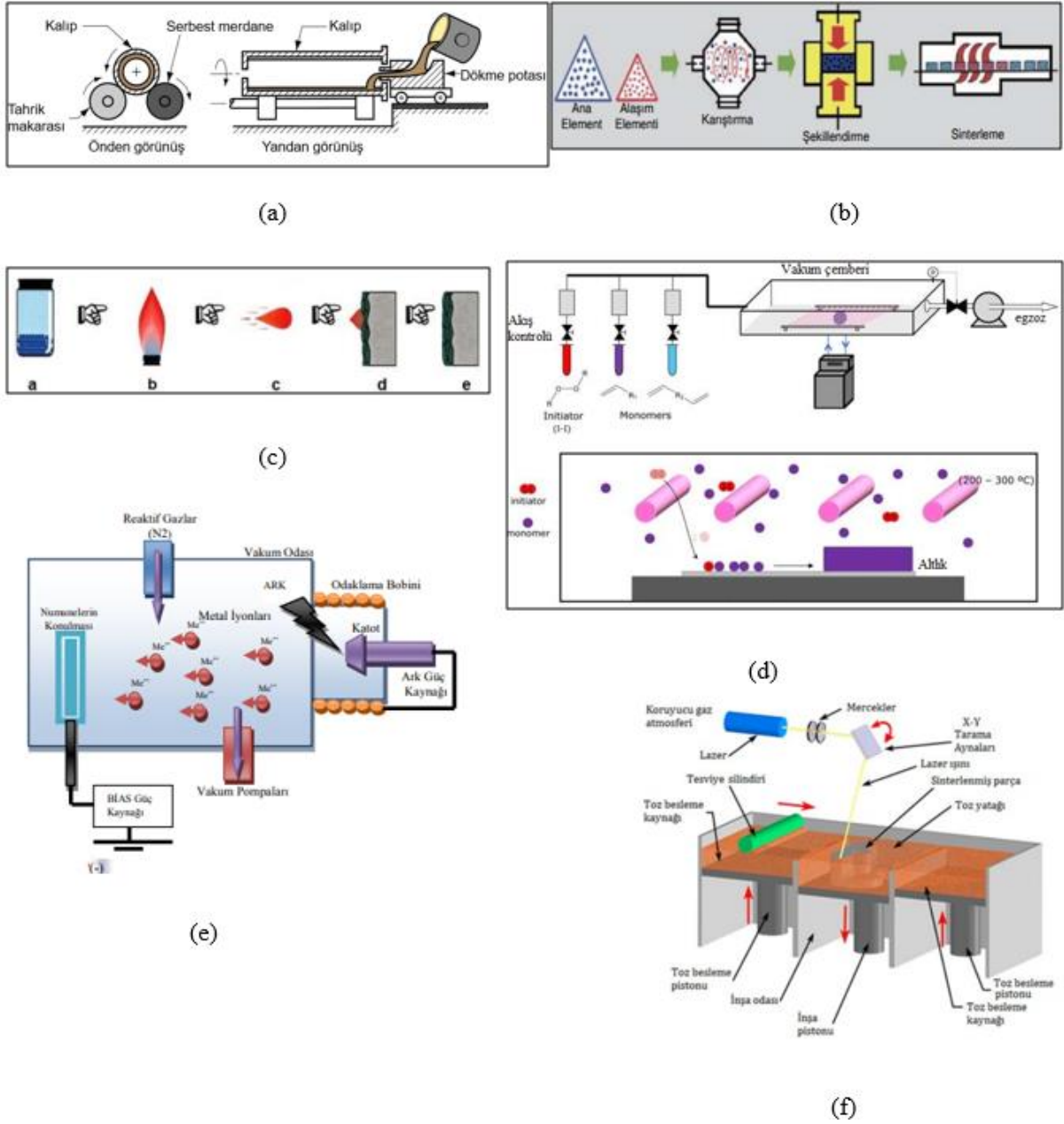


Şekil 7: FDM'in üretiminde kullanılan malzeme kombinasyonları (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378).

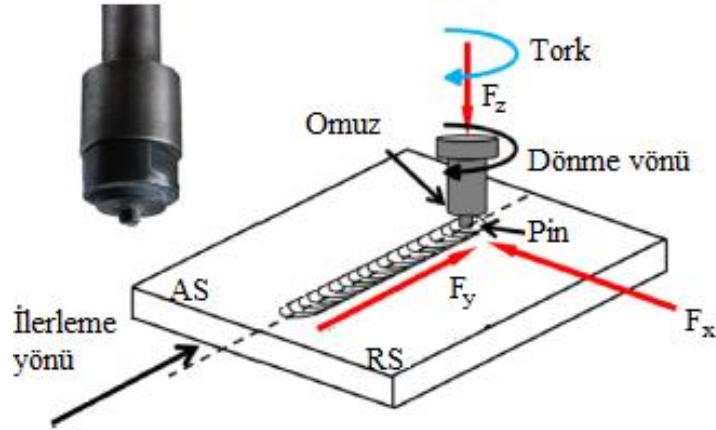
3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ

Sürtünme karıştırma yöntemi (SKY, Friction Stir Processing/FSP), 1991 yılında Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından geliştirilen ve alüminyum alaşımları gibi ergime sıcaklıkları nispeten düşük malzemelerin birleştirilmesi amacıyla kullanılan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK, Friction Stir Welding/FSW)'nın bir türevidir. SKY ifadesi ilk defa Mishra ve arkadaşlarının 1999 yılındaki çalışmalarında anahtar kelime olarak kullanılmıştır. 2003 yılında yine Mishra ve arkadaşları, yöntem ile Al/SiC kompozit malzeme ürettikleri çalışmalarında SKY'nin hafif metal alaşımlarının yüzey kompozitlerinin üretilmesinde yöntemin başarı ile kullanılabilmesini ifade etmişlerdir (Rathee, Maheshwari, Siddiquee ve Sirivastava, 2017: 351); (Miranda, Santos, Gandra, Lopez ve Silva, 2013: 1609). Sonrasında yöntem katı hal malzeme işleme yöntemi olarak kabul edilmiş ve son zamanlarda yüzey modifikasyon yöntemi, tane küçültme tekniği ve hatta mekanik alaşımlama işlemi olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin çalışma sistemi bir farkla SKK ile benzerlik göstermektedir. SKK'nda birleştirme işlemleri gerçekleştirilirken, SKY malzemenin tane yapısını küçültmek ve malzemenin tamamının ya da yüzeyinin mekanik özelliklerini geliştirmek, metal matrisli kompozit malzemelerin içyapı modifikasyonu, toz metalürjisi ile alaşımların homojenizasyonu, ikincil parçacıkların çözündürülmesi, döküm kusurlarının kısmen giderilmesi, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin ve metal köpüklerin geliştirilmesi gibi amaçlarla kullanılır. Şekil 9'da da görüldüğü üzere yöntemde işlem için tasarlanmış kendi etrafında döner malzemeye dalar ve daha önceden belirlenmiş takım yolunu takip ederek malzeme içerisinde ilerler (Rathee, Maheshwari, Siddiquee ve Sirivastava, 2017: 351). Bu hareket hem malzemenin ısınmasını hem de takım etrafındaki malzemenin plastik deformasyona uğramasına neden olur. İşlem katı hal yöntemi olduğundan oluşan sıcaklık ergime sıcaklığının altındadır. İşlem sonrasında oluşan içyapı işlem sırasında oluşan ısı ve plastik deformasyon miktarından, malzeme akışından etkilenir (Weglowski, 2018: 114). SKY birçok tezgâhta gerçekleştirilebilir. Bunlar sistem için geliştirilmiş özel robot sistemler olabileceği gibi CNC işlem merkezi ve hatta konvansiyonel freze tezgâhı olabilir (Weglowski, 2014: 114)

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ



Şekil 8: FDM'in üretiminde kullanılan yöntemler (a-savurma döküm, b-toz metalürjisi, c-termal spray kaplama, d-CVD, e-PVD, g-eklemeli üretim/SLM (El-Galy, Saleh ve Ahmed, 2019: 1378); (Gökçe, Fındık ve Kurt, 2017: 21); (Kaya, Çakır ve Bozkurt, 2017: 38); Aytaç ve Malayoğlu, 2018: 140); (Özsoy ve Duman, 2017: 41)

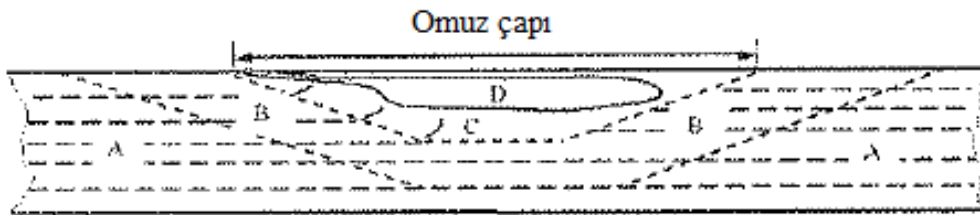


Şekil 9: SKY'nin şematik gösterimi (Weglowski, 2018: 114)

SKY'nde işlem kalitesini ya da diğer bir deyişle yöntem ile üretilen ürünün iç yapısına etki eden temel işlem parametreleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Takım geometrisi,
- Takımın kendi eksenini etrafında bir dakikada tamamladığı tam tur sayısı,
- İlerleme hızı,
- Takımın eğim açısı,
- Takımın malzeme içerisine nüfuziyete miktarı,
- Alaşım malzemesi,
- Soğutma sistemi,
- Bağlama sistemi (Weglowski, 2018: 114).

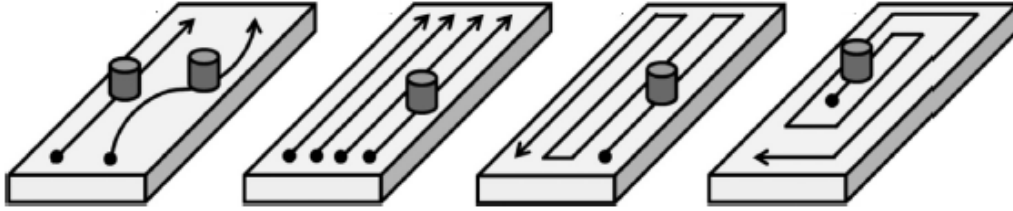
SKY ile elde edilen iç yapı, yukarıda belirtilen işlem parametrelerinden etkilenmekle birlikte Şekil 9'da görüldüğü üzere SKK'ndakine benzer özellikler gösterir. Şekil 10'da A bölgesi, esas malzemeyi (Base Material/BM); B, ısıdan etkilenmiş bölgeyi (Heat Affected Zone/HAZ); C, termomekanik deformasyona uğramış bölgeyi (Thermomechanical Affected Zone/TMAZ); D ise karışma bölgesini (Mixing zone/MZ) ifade etmektedir.



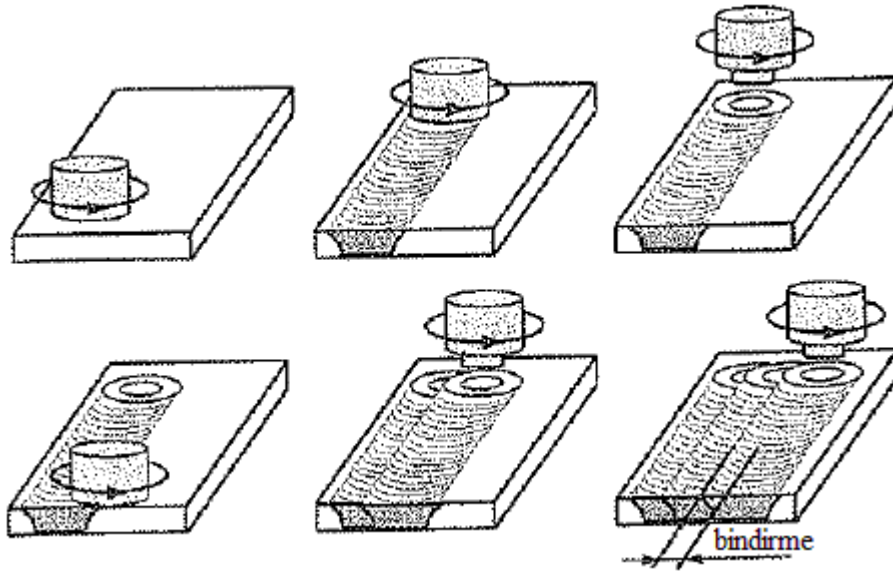
Şekil 10: SKY uygulanmış bölgenin iç yapısı (Weglowski, 2014: 114)

Yukarıda da belirtildiği üzere yöntem frezeleme tekniği ile benzerlik gösterdiği için malzeme üzerinde tek paso ile SKY uygulanan bölge takım ebatları ile sınırlıdır. Yine Şekil 11'de görüldüğü üzere frezeleme işlemine benzer şekilde takım doğrusal ya da karmaşık herhangi bir takım yolunu takip edebilir. Ayrıca malzemenin tamamına SKY uygulanması gerekiyorsa malzeme üzerindeki takım yolları artırılarak yani paso sayısı artırılarak işlem tekrarlanabilir. Malzemenin her yerinde homojen bir iç yapı elde edilmek isteniyorsa takım yollarının bir miktar üst üste binmesi gerekir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta binme miktarının ne kadar olacağıdır. Weglowski çalışmasında bu miktarının takım çapının %5, %10, %25, %50 ve %75'i şeklinde seçilebileceğini ifade etmektedir (Weglowski,

2014: 114). Şekil 12’de çok pasolu işlem ve takım yollarının üst üste binme miktarı şematize edilmiştir.



Şekil 11: SKY’nde uygulanan takım yolu stratejileri (Weglowski, 2018: 114).

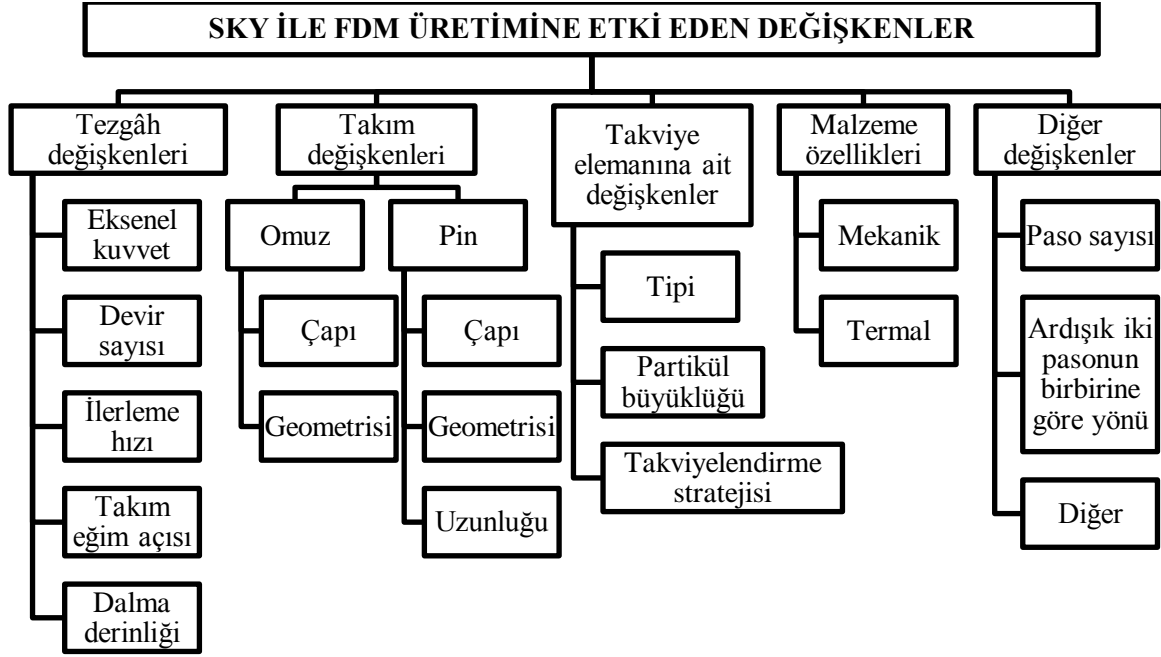


Şekil 12: SKY’nde çoklu paso uygulaması (Weglowski, 2014: 114)

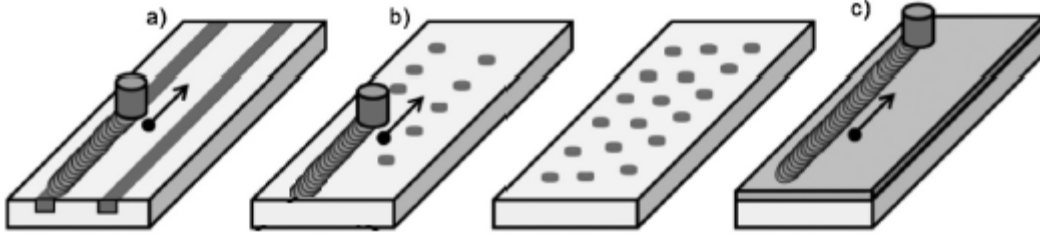
SKY’nde, yöntemin katı hal uygulaması ve tek-adımlı bir süreç olduğu, üretilen malzemenin içyapı ve mekanik özelliklerinin işlem değişkenlerine, uygulama sırasında ekstra ısıtma ya da soğutma yapıp yapılmadığına, işleme uygun takım seçilip seçilmediğine değişkenlik gösterdiği, modifiye edilmiş katman kalınlığının tamamen kullanılan takıma göre değişeceği göz önünde bulundurulmalıdır (Weglowski, 2014: 114).

SKY ile FDM üretiminde süreci etkileyen değişkenler SKY ile kompozit malzeme üretimine benzerdir. Bu değişkenler Şekil 13’te de görüldüğü üzere en genel haliyle, işlemin gerçekleştirildiği tezgâhın özellikleri, takım geometrisi, takviye elemanına ait değişkenler, malzeme özellikleri ve paso sayısı işlem yönü gibi diğer değişkenler şeklinde sıralanabilir.

SKY ile kompozit ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş malzemelerin üretilmesinde kullanılacak birçok metot vardır. Aslında bu değişim takviye elemanının esas malzemeye eklenme yöntemi ile ilgilidir. Literatürde bir sınıflandırılma yapılmasa da takviye elemanının esas malzeme içine gömülme/ bırakılma şekline göre bir sınıflandırma yapılabilir. Şekil 14’te de görüleceği üzere esas malzeme üzerine kanal veya delik açılarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin fonksiyonuna göre takviye elemanları bu bölgelere sıkıştırılır. Kanal ve deliklerin malzeme yüzeyi üzerindeki konumları ve ebatları yine malzemenin fonksiyonuna göre belirlenir. Üçüncü bir yöntem ise malzeme üzerine takviye elemanı yerleştirildikten sonra kapak görevi görececek bir plakanın kullanılması durumudur.



Şekil 13: SKY ile FDM üretiminde işlem değişkenlerinin sınıflandırılması (Rathee, Maheshwari, Siddiquee ve Sirivastava, 2017: 351).



Şekil 14: SKY ile FDM üretiminde uygulanan takviyelendirme yöntemleri (a-kanal açma, b- delik delme, c- kapak plakası kullanımı) (Weglowski, 2018: 114).

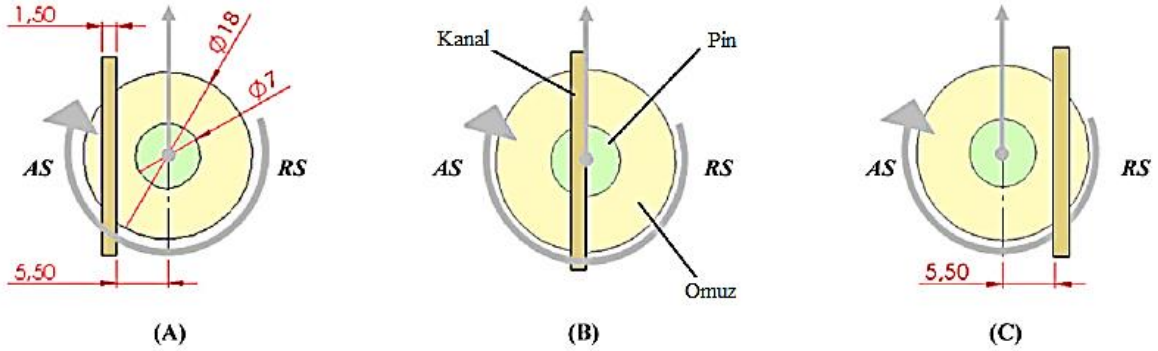
3.1. SKY ile Üretilen Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile kompozit malzemelerin üretimi bilinmektedir ve literatürde oldukça çok sayıda yöntem ile elde edilen numunelerin mekanik değişimlerini inceleyen çalışma mevcuttur. Kısmen daha az sayıda ise yöntemin sayısal modellenmesi ile ilgili araştırmalar bulunmaktadır. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin imalatında takviye partiküllerinin belirli bir fonksiyona göre dağılımının gerekmesi yaklaşık yirmi yıllık bu teknolojinin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bu bölümde FDM'in SKY ile üretilmesini esas alan ve konu ile ilgili oldukça detaylı bilgiler paylaşan az sayıdaki çalışmaya yer verilecektir.

Gandra ve arkadaşları (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira, 2011: 1659) 2011 yılında yayınladıkları çalışmalarında, soğuk sertleştirilmiş ve 400°C'de 3,5 saat tavllanmış olmak üzere iki farklı koşulda, 8mm kalınlığında AA5083 alüminyum alaşımı malzemeyi SiC il takviyelendirmişlerdir. Çalışmalarında, 118,8, 37,4 ve 12,3µm olmak üzere üç farklı ebatta takviye malzemesi kullanmışlardır. Bu partiküller, AA5083 alaşımı plaka üzerine 1,5x1,5mm kesitinde açılan kanal içerisine doldurulmuştur. Daha sonra çapı 7mm olan vidalı pin ile çapı 18mm olan iç büyük omuz geometrisine sahip sertliği 1250Hv olan H13 takım çeliğinden imal edilmiş takım ile SKY uygulanmıştır. SKY uygulamasında, takviye partikülleri ile dolu kanallara farklı mesafelerde konumlanmış üç farklı takım yolu kullanılmıştır. Takım yollarına ait detaylı şema Şekil 15'te verilmiştir. İşlem sırasında kullanılan devir sayısı, ilerleme miktarı, eğim açısı ve dalma/nüfuziyete

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

derinliği sırasıyla, 1000dev/dak, 250mm/dak, 2°, 2mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada SKK yönteminde de olduğu gibi SKY’nde de malzeme akışının takımın dönme ve malzemenin ilerleme yönünün aynı olduğu taraf (ilerleme kenarı-advancing side/AS)’tan zıt olduğu taraf (yığıma kenarı-retreating side/RS)’a doğru olmasından dolayı asimetrik özellik gösterdiği belirtilmiştir. Bu bilgi doğrultusunda ilerleme kenarında malzeme karışımının daha yüksek bir seviyede gerçekleşmesi nedeniyle Şekil 16’da görüldüğü üzere takviye partiküllerinin matris içerisinde daha iyi karıştığı, yığıma kenar tarafında ise daha çok takviye partikülü bulunduğu belirtilmiştir. Şekil 16 ve 17’de de görüldüğü gibi matris içerisine karışmadan bölgesel biriken SiC partikülleri işlene bölgede boşluklar oluşturduğu rapor edilmiştir.



Şekil 15: Belirtilen çalışmada kullanılan takım yolu tipleri (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)

Diğer yandan partikül büyüklükleri arttıkça içyapı içerisinde boşlukların arttığı, küçüldükçe azaldığı bildirilmiştir. Partikül büyüklüğüne göre içyapı değişimi Şekil 19’da verilmiştir.

Diğer yandan en iyi karışıma sahip içyapının takım yolunun tam kanal üzerinden geçtiği şartlarda elde edildiği fakat en çok takım aşınmasının da yine bu şartta meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma içinde yapılan SEM/EDS analizinde üretilen parçaların üst yüzeyinde Şekil 20’de görüldüğü üzere gri olan SiC’den farklı parlak gri bölgeler tespit edilmiş ve Fe, Cr ve Mo içerdiği belirlenmiştir. Bu da işlem sırasında takımın aşındığını göstermektedir.

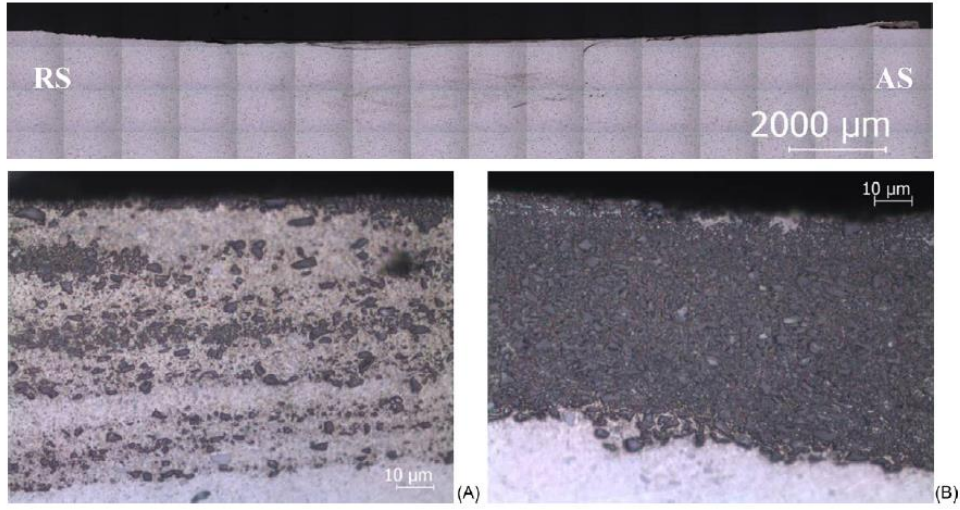
Miranda ve arkadaşlarının (Miranda, Santos, Gandra, Lopes ve Silva, 2013: 1609) 2013 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, ana malzeme olarak AA6082 ve AA5083 alüminyum alaşımı tercih edilmiş, takviye elemanı olarak SiC ve Al₂O₃ tercih edilmiştir. SiC ve Al₂O₃ partiküllerinin boyutları sırasıyla, 35µm ve 45µm olarak bildirilmiştir. Araştırmacılar SKY’ni iki farklı şekilde gerçekleştirmişlerdir. İlkinde takviye elemanına ait partiküller AA5083 alüminyum alaşımı ana malzeme üzerine spreyci yapıştırıcı ile bırakılmış ve işlem SKY ile üretilen katman 200µm kalınlığına ulaşana kadar devam ettirilmiştir. Diğerinde ise AA6082-T6 ana malzeme üzerine farklı şekil ve konumlarda delikler delerek SiC partiküller bu delikler içerisine doldurulmuştur. İkinci yöntemde kullanılan delikler ve parça üzerindeki konumları Şekil 21’de verilmiştir.

Çalışmada SKK yönteminde kullanılan benzer klasik bir takım ile SKY gerçekleştirilmiş ve boşluk ve çatlak içermeyen bir içyapı elde edildiği ve takviye partiküllerinin matris malzemeye iyi bağlandığı bildirilmiştir. Gandra ve arkadaşlarının çalışmasında da belirttiği gibi SiC partiküllerinin SKY’nde kullanılan takımın daha hızlı aşınmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar, diğer yöntemle kıyasla, delik delme yönteminin SKY uygulamalarında daha kullanışlı bir yaklaşım olduğunu da belirtmişlerdir.

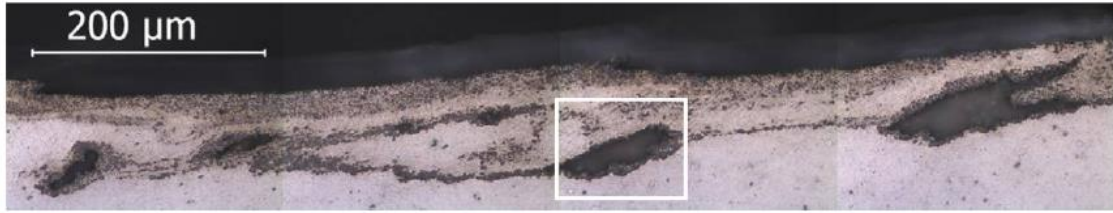
Sharma ve arkadaşlarının (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122) 2017 yılında gerçekleştirdikleri çalışma FDM’in SKY ile üretiminde daha dikkate değerdir. Araştırmacılar 6mm kalınlığında ticari saflıktaki alüminyum alaşımı matris malzeme üzerine 44µm çapında TiC takviye partikülleri eklemişlerdir. FDM’in doğasına uygun şekilde hacimsel derecelendirme esas alınarak partiküllerin doldurulması için malzeme üzerine delinen delikler arası mesafe, belirli bir

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

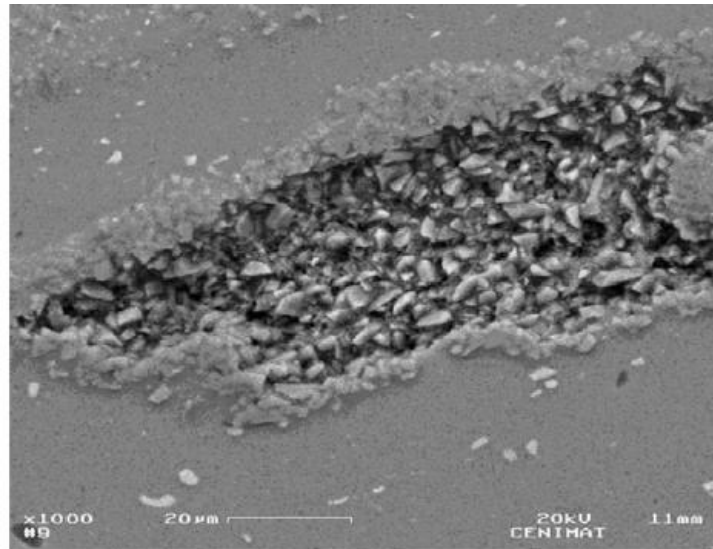
matematiksel modele göre belirlenmiştir. Deliklerin malzeme üzerindeki konumlarının temsili gösterimi ve derecelendirme sırasıyla Şekil 22 ve 23’te verilmektedir.



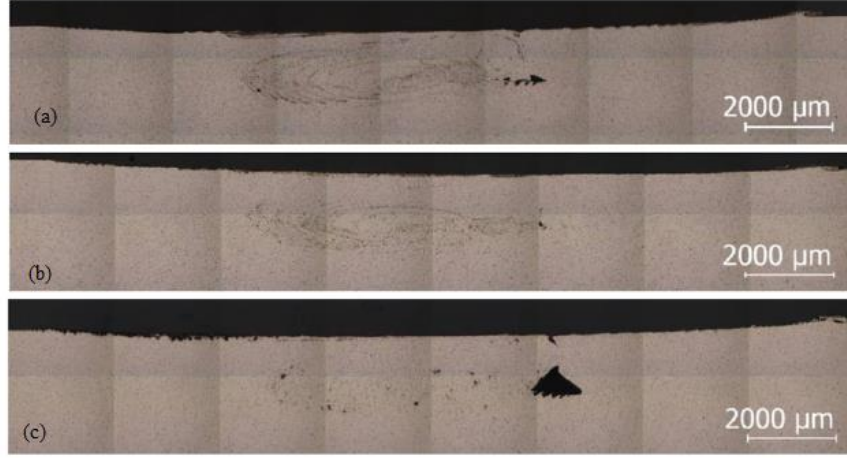
Şekil 16: SKY ile elde edilen içyapının ilerleme ve yığıma kenarında değişimi (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



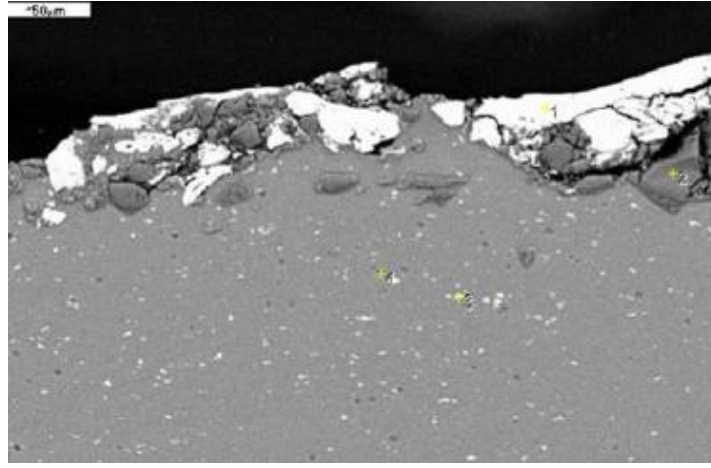
Şekil 17: SKY ile elde edilen içyapıda matrise karışmadan kalan takviye malzemesi partiküllerinin içyapıda boşluklara neden olması (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



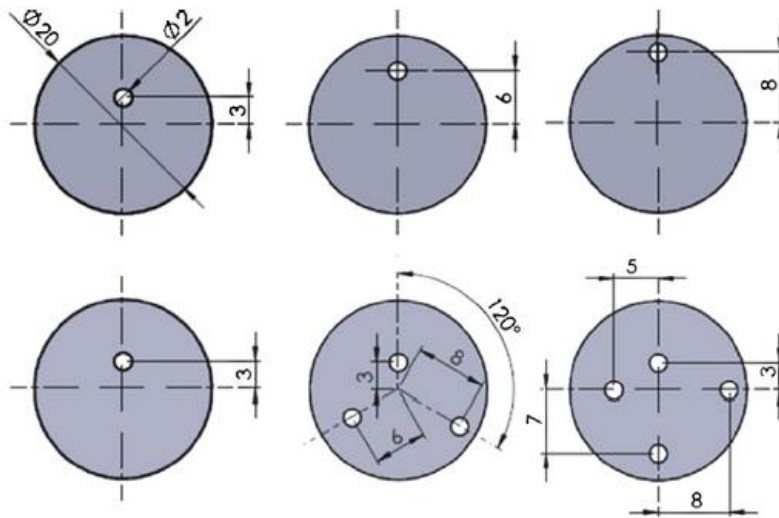
Şekil 18: Şekil 17’de belirtilen alanın SEM görüntüsü (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



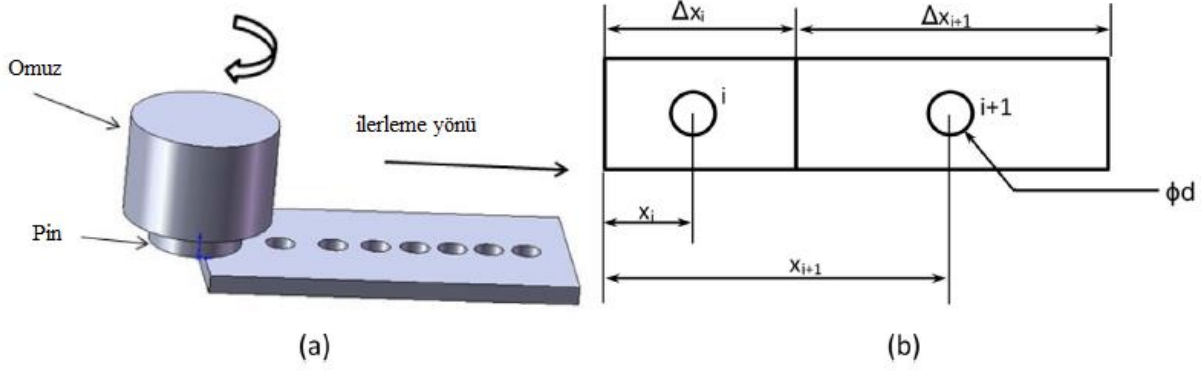
Şekil 19: İçyapının partikül boyutu ile değişimi (a-12.3µm, b-37.4 µm, c-118.8 µm) (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



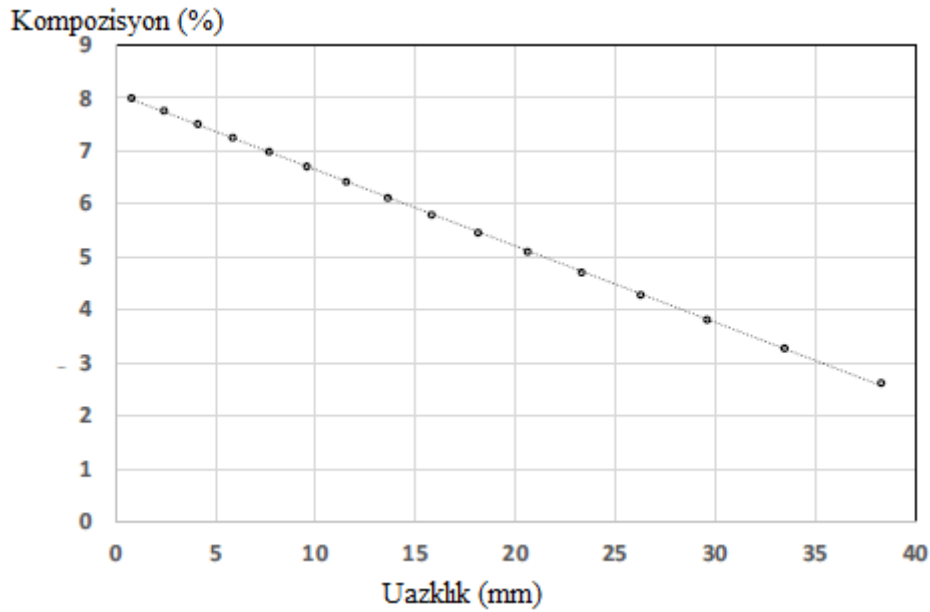
Şekil 20: Takım aşınması ile içyapıya karışan takım malzemesinin SEM görüntüsü (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



Şekil 21: AA6082 alüminyum ana matris üzerine SiC partiküllerini doldurmak üzere delinen deliklerin yerleşimi (Gandra, Miranda, Vilaca, Velhinho ve Teixeira,2011: 1659)



Şekil 22: Miranda ve arkadaşlarının çalışmasında takımın hizalanması (a) ve deliklerin yerleşimi (b) (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)



Şekil 23: FDM'in SKY ile üretimi için derecelendirme şartı grafiği (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)

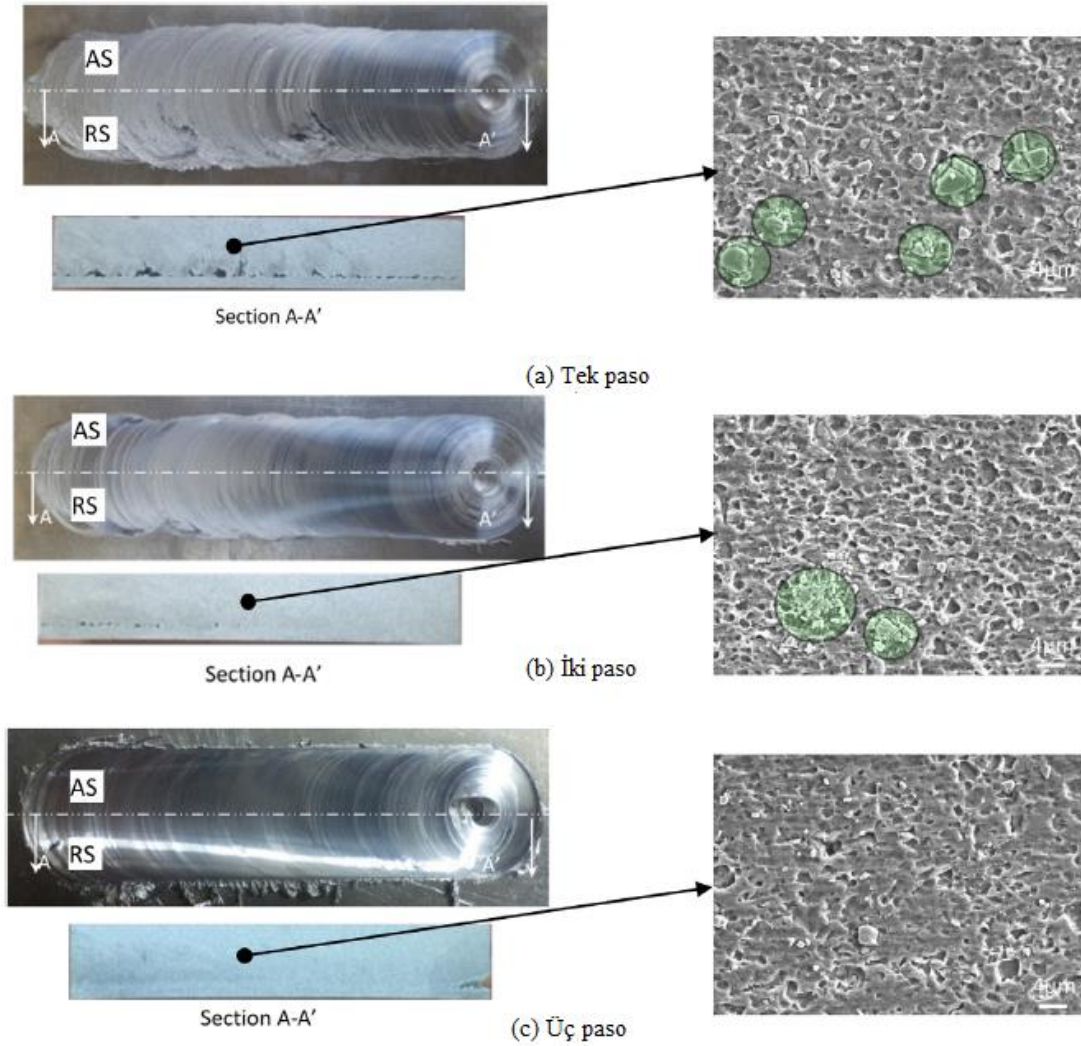
Çalışmada pin çapı 6.2mm boyu 5.2mm, omuz çapı 27mm olan H13 takım çeliğinden imal edilmiş basit bir takım kullanılmıştır. Devir sayısı 1000dev/dak, ilerleme hızı 50mm/dak olarak belirlenmiştir. Belirlenen fonksiyona göre değişen aralıklarla parça boyunca çapı 1mm ve derinliği 5.2mm olan 40 adet delik delinmiştir. TiC partikülleri etanol ile karıştırılarak bu deliklere doldurulmuş ve kuruması beklenmiş devamında SKY belirtilen parametreler ile uygulanmıştır. Çalışmada bir, iki ve üç paso SKY uygulanmış ayrıca takım yollarının birbirine göre yönleri değişken olarak seçilmiştir.

Yapılan içyapı incelemelerinde, merkezde yeterli karıştırma gerçekleşmediği için boşluklar meydana geldiği, ancak belirlenen kurala göre takviye partiküllerinin soldan sağa doğru artmasıyla bu boşlukların azaldığı, aynı zamanda paso sayısının artmasıyla da yine boşluk oluşumunda azalma görüldüğü hatta üç paso ile gerçekleştirilen işlemlerde hiç boşluk oluşumuna rastlanmadığı rapor edilmiştir. Belirtilen içyapı incelemeleri Şekil 24'te verilmiştir.

FDM üretimi için belirlenen kurala göre TiC partiküllerinin malzeme kompozisyonunda azaldığı bölgelerde beklendiği üzere sertlik azalmıştır. Dikkati çeken diğer bir nokta ise paso sayısının artmasının da sertliği azalttığıdır. Belirtilen değişim Şekil 25'te grafik olarak verilmiştir.

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

Aynı zamanda değişen kompozisyonla birlikte numunelerin mekanik özelliklerinde de beklendiği ya da diğer bir tanımla hedeflendiği üzere değişiklikler görülmüştür. Şekil 26'da verilen grafikler, bu değişimi özetler niteliktedir.



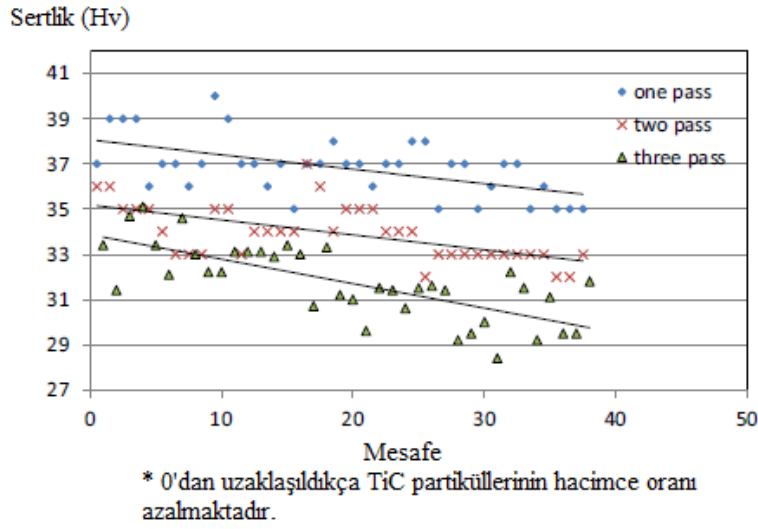
Şekil 24: FDM'in SKY ile üretimi ile elde edilen ürünlerin makro ve mikro yapı incelemeleri (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)

Numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimlerden de görüleceği üzere paso sayısı arttıkça sürtünme ve malzeme akışından kaynaklanan ısı miktarı artmıştır. SKY'de karıştırma işlemi esas malzemenin tanelerini parçalayarak yeniden daha küçük tanelerin oluşmasına sebebiyet verir ancak ikinci ve üçüncü pasolarla gelen ek ısı artışı ilk pasoda elde edilen küçük tanelerin büyümesine yetecek zaman ve ısıyı vermiş olur. bu olay aynı zamanda TiC parçacıklarının boyutlarının da küçülmesine de sebebiyet verir. Tüm bunlar da sertlik başta olmak üzere mekanik özelliklerdeki değişimi açıklamaktadır. Tablo1'de çalışmada elde edilen tane boyutlarındaki değişim verilmektedir.

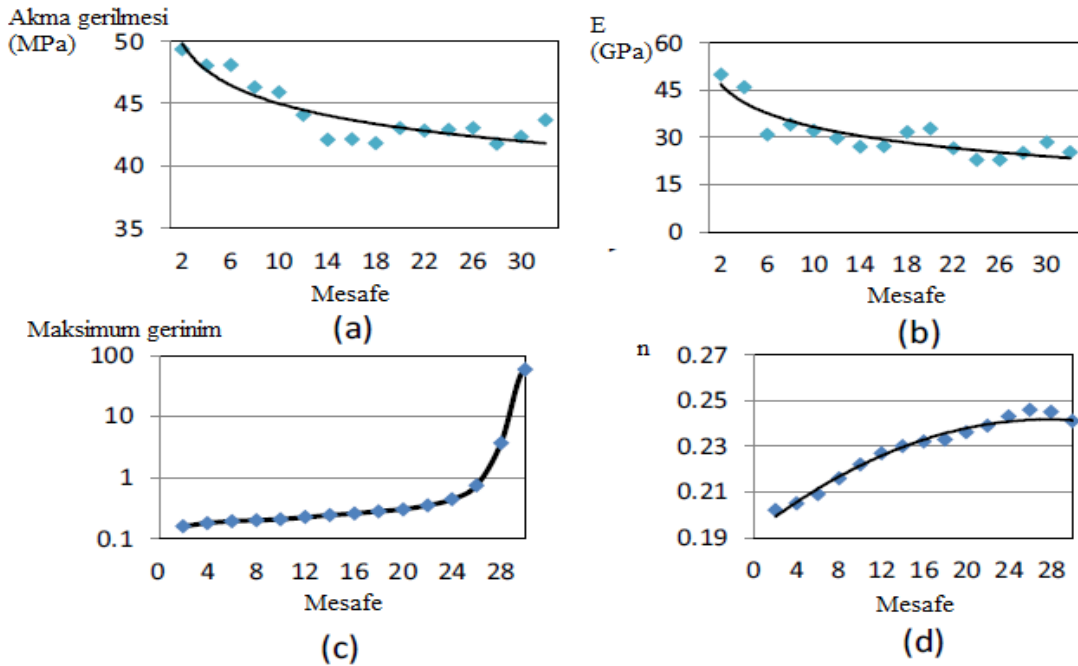
Ramezani ve arkadaşları (Ramezani, Davoodi, Farahani ve Khanli, 2019: 503). 2019 yılında yayınladıkları çalışmalarında AA7075 matris malzeme ve SiC takviye elemanı kullanmışlardır. Diğer araştırmacıların aksine, takviye partiküllerinin gömülmesi için delik yerine 2mm genişlik ve 4mm derinliğinde kanallar kullanmışlardır. Çalışmada SKY için beşer farklı devir sayısı, ilerleme hızı ve paso sayısı tercih edilmiştir. Sonrasında yüzey kalitesi ve topolojisi, içyapı ve mikrosertlik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Artan devir sayısı ile işlem sıcaklığının ve dolayısıyla plastik deformasyon miktarının artması yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Benzer nedenlerden dolayı paso sayısının artması da yüzey kalitesine artırmaktadır. Dahası ilerleme hızının yüzey kalitesine etkisi göz

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

ardı edilebilecek kadar azdır. Diğer yandan artan devir sayısı ile üretilen malzemenin mikrosertliği azalırken artan ilerleme hızı ile mikrosertlik artmaktadır. Bunun sebebi ise yüksek ilerleme hızlarında malzeme akışı ve lokal ısı girdisinin azalmasıdır.



Şekil 25: Deneylerde elde edilen numunelerin sertlik değişim profilleri (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)



Şekil 25: Hacimce takviye partiküllerinin artması ile numunelerin mekanik özelliklerinin değişimi (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)

Tablo 1: SKY ile matris malzemenin ortalama tane boyutlarının değişimi (Sharma, Bandari, Ito, Kohama, Ramji, M. ve BV, 2017: 122)

	Ortalama tane çapı (μm)	
	Tane sınırı yönelim açısı $<15^\circ$	Tane sınırı yönelim açısı $>1^\circ$
Tek paso	15.94	8.89
İki paso	24.64	11.25
Üç paso	28.41	17.35

4. SONUÇLAR

FDM'lerin SKY ile üretilmesi ile ilgili yapılan araştırmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. FDM'in SKY ile üretilmesinde takviye partiküllerinin ana matris içerisine gömülme şekli FDM'in dercelendirilmesini etkilemektedir. Bu noktada matris malzeme üzerine delik delinen yöntem malzeme fonksiyonunun korunmasında daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.
2. SKK'nda olduğu gibi SKY ile elde edilen içyapı asimettiktir. Yani malzemenin yığıma kenarı tarafı ile ilerleme kenarı tarafı farklı özellikler göstermektedir. Bu nedenle SKY'nde takip edilen takım yolu üzerinde çalışmaya gerek duyulmaktadır.
3. Ayrıca yine SKK'nda olduğu gibi FDM'in içyapı ve mekanik özellikleri SKY için kullanılan işlem parametrelerinde etkilenmektedir. Devir sayısının artması işlem sıcaklığını artırması nedeniyle hem takviye partiküllerinin matris malzeme ile daha başarılı bağlanmasını sağlamakta hem de yüzey kalitesini arttırmaktadır. Diğer yandan elde edilen yüksek ısı ürününü mikrosertliğini azaltmaktadır. İlerleme hızı ise yüzey kalitesi üzerinde göz ardı edilebilecek etkiye sahipken artan ilerleme hızı malzemenin sertliğini de arttırmaktadır. Ancak yeterli karıştırma miktarına izin verecek hızlar bu noktada önem taşımaktadır. Zira yüksek ilerleme hızlarında ısı girdisi ve metal akışı az olacağı için takviye partiküllerinin matris malzeme içerisinde yeteri kadar karışması sağlanamamaktadır.
4. Paso sayısı da devir sayısı ile benzer etkiye sahiptir. İlk pasoda karıştırma ile ana matris malzemeye ait taneler kırılır ve merkezde küçük ve eş eksenli taneler elde edilir. Paso sayısının artması ve dolayısıyla işlem sıcaklığının artmasıyla yeni oluşan küçük tanelerin büyümesi için yeterli zaman verilir ve merkezdeki tane çapları büyür ve malzemenin sertlik değerlerini düşürür.
5. SKY'nde kullanılan takım işlem sırasında aşınmakta ve takım malzemesinden kopan partiküller yeni üretilen kompozit yapıya karışmaktadır. Önlenmesi için takım malzemesi değiştirilebilir farklı kaplamalar denenebilir ve dahası delik ya da kanal formları iyileştirilebilir.
6. FDM farklı kriterlere göre dercelendirildiklerinden dolayı literatürde sadece kombinasyona göre dercelendirilmiş FDM'in üretimi ele alınmıştır hem malzemeler hem de yöntem farklı dercelendirmelere göre üretime açıktır.
7. Yine literatürde genellikle alüminyum alaşımları matris olarak tercih edilmiştir. Ancak FDM'in biyo malzeme olarak uygunluğu bu alanda da çalışma yapılmasına açıktır.

5. KAYNAKÇA

Ağca, S., & Akar, N. (2017). Santrifüj Döküm Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemelerde Üretim Parametrelerinin Malzemenin Sertliği Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 121-127. (DOI) : 10.2339/2017.20.1 121-127

Akbaş, Ş. D. (2018). Fonksiyonel derecelendirilmiş ortotropik bir kirişin statik ve titreşim davranışlarının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 69-82. DOI: 10.25092/baunfbed.343227

Aksoy, H. G., & Şenocak, E. (2011). Fonksiyonel derecelendirilmiş ve çok katmanlı kompozit malzemelerde dalga yayılması. *İTÜDERGİSİ/d*, 9(2), 105-113.

Alağöz, H., Gülgeç, M. ve Konez, A. (2004) Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ve kullanım alanları. *Mühendis ve Makine Dergisi*, Erişim adresi: <https://www.mmo.org.tr/mayis-2004/makale/makale-fonksiyonel-derecelendirilmis-malzemeler-ve-kullanim-alanlari>

Apatay, T., Serkan, D. A. Ğ., Güler, M. ve Gülgeç, M. (2010). Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalarda sürtünmeli rijit zimba etkisiyle oluşan yüzeyaltı temas gerilmeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 611-623.

FD MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

Apatay, T. (2010). Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalarda çatlak ve temas problemi (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Aytaç, A., & Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD ince film kaplamaların karşılaştırılması ve DVD kaplama teknolojisinin endüstriyel uygulamaları üzerine kavramsal, akademik ve teorik bir analiz. *J Def Sci*, 17, 131-164.

Baştürk, S. (2019). Bazalt/Ni, W/Ni, ve B/Ni fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit plâkaların dinamik basınç yükü altındaki davranışlarının analizi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 464-478. doi: 10.28948/ngumuh.517162

[Chakraverty](#), S. ve [Pradhan](#), K. K. (2016). Origin and Basics of Functionally Graded Structural Members. *Vibration of Functionally Graded Beams and Plates* içinde. 7-18

El-Galy, I. M., Saleh, B. I. ve Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1378-1401. doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4

Ersan, Ç. (2008). Fonksiyonel derecelendirilmiş disklerde termal gerilme analizi (Yüksek Lisans Tezi). Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Gandra, J., Miranda, R., Vilaca, P., Velhinho, A., & Teixeira, J. P. (2011). Functionally graded materials produced by friction stir processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(11), 1659-1668. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.04.016

Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri. *Mühendis ve Makina*, 58(686), 21-47.

Kaman, M. O. ve Cetişli, F. (2011). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ile kaplı silindirde çatlak problemi. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011)*, Elazığ, Türkiye, 5-7 Ekim 2011.

Kaya, Ö. A., Çakır, K., & Bozkurt, Y. Plazma Püskürtme Yöntemiyle Çelik Levha Üzerine Farklı Alaşımların Kaplanması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. 9(3). 36-42. doi:10.29137/umagd.372934

Karahalil, B. (2012). Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerde Gerilme Yığılmalarının İncelenmesi (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Khan, T., Zhang, N., & Akram, A. (2019). State of the art review of Functionally Graded Materials. 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) (1-9). IEEE.

Maalawi, K. (2018). Optimization of Functionally Graded Material Structures: Some Case Studies. In *Optimum Composite Structures*. IntechOpen.

Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. (2012). Functionally graded material: an overview. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III, (WCE 2012)*, July 4 - 6, 2012, London, U.K.

Miranda, R. M., Santos, T. G., Gandra, J., Lopes, N., & Silva, R. J. C. (2013). Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(9), 1609-1615. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.03.022

Öktem, A. (2014). Fonksiyonel Derecelendirilmiş (Fd) İleri Kompozit Plakların Statik Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1). 111-119.

Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.

Parihar, R. S., Setti, S. G., & Sahu, R. K. (2018). Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 309-336.

Pradhan, K. K. ve Chakraverty, S. (2019). Overview of functionall graded materials. *Computational Structural Mechanics içinde* 1-10

Rathee, S., Maheshwari, S., Siddiquee, A. N. ve Srivastava, M. (2018). A review of recent progress in solid state fabrication of composites and functionally graded systems via friction stir processing. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(4), 334-366. doi:10.1080/10408436.2017.1358146

Ramezani, N. M., Davoodi, B., Farahani, M., & Khanli, A. H. (2019). Surface integrity of metal matrix nanocomposite produced by friction stir processing (FSP). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(11), 503. doi:10.1007/s40430-019-2014-2

Sharma, A., Bandari, V., Ito, K., Kohama, K., Ramji, M., & BV, H. S. (2017). A new process for design and manufacture of tailor-made functionally graded composites through friction stir additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 122-130. doi:10.1016/j.jmapro.2017.02.007

Shen, H. S. (2016). *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*. CRC press.

Sueri, S. (2015). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemedden (Fdm) Yapılmış Kabukların Farklı Sınır Koşulları Altındaki Dinamik Davranışlarının Sonlu Elemanlar Analizi Kullanarak Hesaplanması (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Topçu, M., Taşgetiren, S., & Uluköy, A. Alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin aşınma davranışına yaşlandırma işleminin etkisi, 13th International MAterials Symposium (IMSP'2010), Denizli, Türkiye, 13-15 Ekim 2010.

Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. V. (2014). Functionally graded composite materials: an overview. *Procedia Materials Science*, 5, 1291-1299.

Uluköy A. (2016). Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin Lineer Burkulma Analizi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı (122-127)

[Vatanabe](#) S. L., [Rubio](#) W. M., (2014). Modeling of Functionally Graded Materials. [Comprehensive Materials Processing](#) içinde [Volume 2](#), 261-282

Węglowski, M. S. (2018). Friction stir processing–State of the art. *Archives of civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 114-129. doi:10.1016/j.acme.2017.06.002

Węglowski, M. (2014). Friction stir processing technology–new opportunities. *Welding International*, 28(8), 583-592. doi: 10.1080/09507116.2012.753216

Yıldırım, B. (2004). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedden yapılmış kenar çatlaklı bir tabakada ısıl şok kırılmasının sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(3).

Zhang, N., Khan, T., Guo, H., Shi, S., Zhong, W., & Zhang, W. (2019). Functionally Graded Materials: An Overview of Stability, Buckling, and Free Vibration Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. 1-18. doi:10.1155/2019/1354150

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

Levent Elen*, Yunus Türen, Mehmet Ünal

* Karabük Üniversitesi T.O.B.B. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050 Merkez/Karabük.

leventelen@karabuk.edu.tr

* Sorumlu yazar

1. GİRİŞ

En hafif metalik yapı malzemesi olan Magnezyum (*Mg*) ve alaşımları, yüksek özgül mukavemet, özgül sertlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerinin yanı sıra sahip olduğu düşük yoğunluklarından dolayı portatif mikro elektronik, telekomünikasyon, havacılık ve otomobil endüstrisi gibi pek çok mühendislik alanında oldukça fazla kullanılmaktadır (Gaines ve ark., 1996). Özellikle (ortalama) *Mg* – %9 *Al* %0,8 *Zn* ve %0,2 *Mn* içeren AZ91 alaşımı, tüm *Mg* döküm ürünlerinin yaklaşık %90'ında kullanılan ve en çok tercih edilen *Mg* alaşımıdır (Blawert ve ark., 2004). Her geçen gün kullanım alanı artan AZ91 alaşımlarından tüm bu sektörler, daha gelişmiş mekanik özelliklere sahip AZ91 alaşımlarının bekleyişi içerisine girmiştir. Dolayısıyla AZ91 başta olmak üzere tüm *Mg* alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi akademik çalışmalarda da odak noktası olmuştur.

AZ91 alaşımlarının mekanik özellikleri, alaşımlandırma yapılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elen, yapmış olduğu çalışmada AZ91 alaşımına farklı oranlarda bizmut (*Bi*) ve antimon (*Sb*) elementlerini ilave ederek mekanik özelliklerin geliştiğini rapor etmiştir (Elen L. , 2012). Schwam vd., yapmış olduğu çalışmada *Mn* ve *Ca* gibi elementlerin mekanik özellikleri geliştirdiğini bildirmiştir (Schwam ve ark., 2000). (Candan ve ark., 2011), çalışmalarında *Ti* elementinin mekanik özelliklerini (nihai çekme gerilmesini %18'e kadar ve akma dayanımını %47'ye kadar) arttırdığını tespit etmiştir. (Barber, 2004), nadir toprak elementlerinin ısı dayanımını yanı sıra sürünme dayanımını da arttırdığını rapor etmiştir. Bunun yanı sıra, AZ91'in ve genel olarak *Mg* alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde soğuma hızının da etkisi oldukça önemli olduğu (Elen L. , 2012), (Elen ve ark., 2019), (Elen, ve ark., 2019), (Ünal, 2014) tarafından yapılan bazı çalışmalarda rapor edilmiştir. Ayrıca hem mikroyapı hem de mekanik özellikler üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak, sabit sıcaklık ve zaman aralıkları seçilmiş olan ısıtma uygulamaları yapılmıştır. Fakat farklı sıcaklık ya da zaman aralıklarında mikroyapı ve mekanik özelliklerde ne tür değişimlerin olabileceği konusunda literatürde ki bilgi kısıtlı kalmıştır. Çeşitli ısıtma koşullarında mikroyapı değişimi için açıklığa kavuşturulması gereken birçok belirsizlik vardır. Özellikle, ısıtma sırasında işleme koşullarının faz dönüşüm kinetiği üzerindeki etkileri hakkında bilgi oldukça zayıf kalmıştır (Wang ve ark., 2006).

Dolayısıyla bu çalışmanın ana hedefi, çözelti ve yaşlandırma işlemleri sırasında β -($Mg_{17}Al_{12}$) fazının çözünme ve çökme kinetiğini karakterize etmek ve etkisini incelemektir. Bu sebeple yapılan bu çalışmada, AZ91 *Mg* alaşımlarına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) element ilavesi (*Bi* ve *Sb*), 420 °C'de homojenleştirme ve (8, 16, 32 saat) yaşlandırma ısıtma işlemleri uygulayarak temel sertlik özellikleri ve mikroyapı çalışmalarını kapsamaktadır.

2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Magnezyum

Magnezyum (*Mg*) elementinin keşfi 1800'lü yılların başlarına dayanmaktadır. Genel olarak *Mg* yapısal uygulamalar için kullanımı mümkün olan metallerin en hafifidir (Beffort ve Hausmann, 1999). Sahip olduğu düşük yoğunluk sebebiyle düşük eylemsizlik özelliği, hızlı hareket ederek görev yapan parçalar için bir avantajdır. Bunun yanısıra hafiflik, imalat esnasında parçaların daha kolay taşınması ve bitmiş ürünlerin daha ucuza ve kolay sevk edilmesi demektir (Kazdal, 1999). *Mg*'un fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Saf magnezyumun özellikleri (Beffort ve Hausmann, 1999), (Vogel, 2002)

Özellik	Değer
Ergime Noktası	650°C ± 2
Kaynama Noktası	1107°C ± 10
Ergime Gizli Isısı	0,37 MJ/kg
Yanma Isısı	25,1 MJ/kg
Elektriksel Direnci 20°C'de	4,45 µΩ cm
Isıl İletkenliği 25°C'de	155 W/(kg K)
Isıl Genleşme Katsayısı (Lineer) 20°C'de	25,2 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Yoğunluk 20°C'de 650°C'de (katı) 650°C'de (sıvı)	1,738 g/cm ³ 1,65 g/cm ³ 1,58 g/cm ³
Katılaşma Sırasında Hacimsel Değişim	%4,2
Soğuma Sırasında Hacimsel Değişim (650-20°C)	%5

Mg alaşımlarının isimlendirilmesi ASTM (A275) standartlar sisteminin tarafından belirlenmiştir. Yönteme göre iki harfle beraberinde iki rakam kullanılmaktadır. Harfler, en büyük (%) miktardaki iki element için tanımlanmış olan harf kısaltmalarını, rakamlar ise bu elementlerin miktarca (%) olarak en yakın tam sayıya yuvarlanmış değerdir. Yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinin harf sembolleri Tablo 2'de listelenmiş olarak verilmiştir.

Tablo 2: Alaşım elementleri ve harf sembolleri (Gaines ve ark., 1996), (Barber, 2004), (Beffort ve Hausmann, 1999), (Polmear, 1989), (Zhang Z. , 2000)

Harf	A	C	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Cu	Re	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

AZ91 alaşımındaki harf ve rakam açıklaması aşağıda verilmektedir;

A → Alüminyum (*Al*)'u yani *Mg*'dan sonra alaşımdaki en büyük miktardaki elementi ifade eder.

Z → Çinko (*Zn*)'yu yani alaşım içerisinde ikinci olarak en fazla miktarda bulunan elementi ifade eder.

9 → Alaşım içerisindeki *Al* oranının 8,6- 9,4 aralığında olacağını ifade eder.

1 → Alaşım içerisindeki *Zn* oranının 0,6- 1,2 aralığında olacağını ifade eder.

Bazı *Mg* alaşımlarının ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94'e göre belirlenmiş olan standartları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Bazı Mg alaşımları için belirlenmiş standartlar ve bileşimler (ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94) (Zhang Z. , 2000), (Bolstad, 2000)

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları					
	AZ91	AM60	ZK60	AS21	AS41	ZE10
Al	8,5-9,5	5,6-6,4	0,05 max	1,9-2,5	3,7-4,8	0,05 max
Zn	0,45-0,90	0,20 max.	4,8-6,2	0,15-0,25	0,10 max.	1,0-1,5
Mn	0,17-0,40	0,26-0,50	0,1 max.	0,20 min.	0,35-0,60	0,1 max.
Si	0,05 max.	0,05max.	0,05 max.	0,70-1,2	0,60-1,4	0,05 max.
Fe (max)	0,004	0,004	0,03	0,004	0,0035	0,03
Cu (max)	0,025	0,008	0,05	0,008	0,015	0,02
Ni (max)	0,001	0,001	0,005	0,001	0,001	0,005
Be	-	-	0,002	-	-	0,002
Ce	-	-	-	-	-	0,12-0,25
Zr	-	-	0,3-0,9	-	-	-
Diğer	0,01	0,01	-	0,01	0,01	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

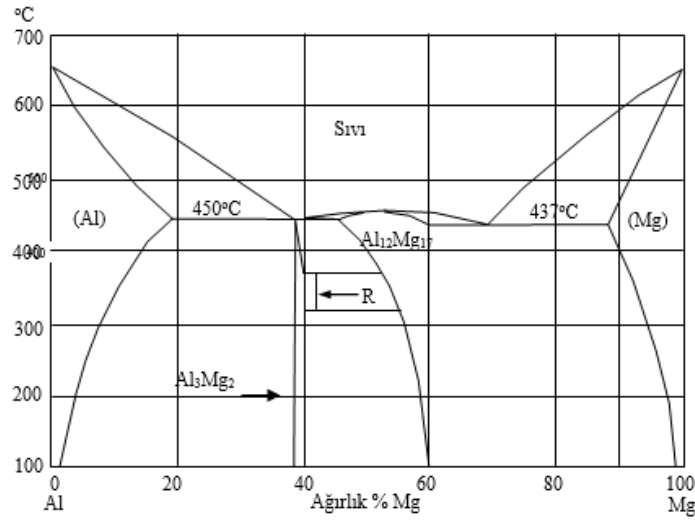
2.1.1. Magnezyum Alaşımlarına İlave Edilen Elementlerin Etkisi

Mg'un özelliklerini daha fazla geliştirmek için bir ya da daha fazla alaşım element ve/veya elementleri katılarak döküm ürünler elde edilmektedir. Hegzagonal kafes yapısına sahip olan *Mg*'un tane çapı da oldukça fazla sayıdaki elementle katı çözünebilirliği mümkün kılar. Alaşımlandırmadaki temel amaç malzemenin dayanım özelliklerini geliştirmektir. *Mg* yapısal uygulama malzemesi olarak kullanıldığında *Zn*, *Zr*, *Mn*, *RE*, *Ce*, *Ag*, *Al* ve *Th* vb. elementlerin ilavesi ile alaşımlandırılabilir. Bu elementlerden herhangi biri ya da birkaç tanesi kullanılarak alaşımlandırıldığı takdirde genel olarak yüksek mukavemet/ağırlık oranı elde edilir. *Al* ise, *Mg* alaşımlarında en fazla kullanılan alaşım elementidir (Barber, 2004), (Zhang Z. , 2000), (Johansson, 2002).

2.1.1.1 Alüminyum (Al)

Al, ergiyik haldeki *Mg*'un dökülebilirliğini geliştirerek döküm ürünlerinde oluşabilecek mikro gözenekleri azaltır. Ayrıca katı çökelti dayanımını arttıran *Al* ilavesi, alaşımın sertliğini, mukavemetini ve de katılma zamanını artırırken sünekliğini düşürmektedir. Çökelti sertleşmesi ve katı eriyik sertleşmesi mekanizmasıyla oluşan β - $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalığı çok düşük (≤ 120 °C) sıcaklıklarda meydana gelerek alaşımın mukavemetini artırır. Bununla birlikte, çok fazla miktarda *Al* ihtiva eden alaşımlarda ise aksine mikro gözeneklere karşı eğilim ortaya çıkar (Schwam ve ark., 2000), (Barber, 2004) (Zhang Z. , 2000), (Johansson, 2002). *Mg*-*Al* denge diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.

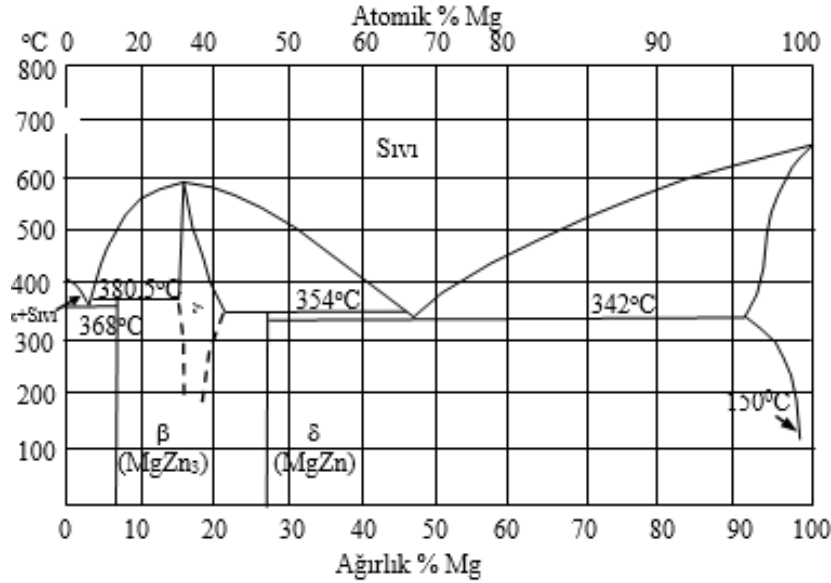
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



Şekil 2: Mg-Al denge diyagramı (Baker, 1998), (Guthrie ve ark., 1996)

2.1.1.2 Çinko (Zn)

Zn, alaşımın katılma sıcaklığını düşürür ve aynı zamanda tane sınırlarındaki ötektik miktarını artırır. Mg'un korozyon özelliklerini arttırmak ve bakırın bu yöndeki kötü etkilerini ortadan kaldırmak için Zn ilave edilmektedir (Barber, 2004), (Watari, 2006), (Schwam ve ark., 2000). Çökelti sertleşmesi ile Zn, alaşımın oda sıcaklıklarında dayanımını ve ergiyik metalin akıcılığını artırır. Fakat, tane sınırlarında Zn çökmesi durumunda sıcak yırtılma ortaya çıkardığı için %2 gibi bir oranla sınırlıdır. Mg-Zn denge diyagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Mg-Zn denge diyagramı (Schwam ve ark., 2000), (Zhang Z. , 2000)

2.1.1.3 Mangan (Mn)

Mg içerisinde (en fazla %3,4'e kadar) sıcaklığa bağlı olarak katı eriyik oluşturabilen Mn'ın Mg ve alaşımlarında, korozyon direnci oluşturabilmek için önemli bir elementtir. Ayrıca Fe-Mn çökeltilerinde, Fe'in olası istenmeyen etkilerinin kontrolü için Mn önemli bir element ilavesidir. Mn,

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

aynı zamanda *Mg* alaşımlarının sürünme direncini geliştirir ancak, dayanımlarının artırılmasında etkisi azdır (Schwam ve ark., 2000), (Barber, 2004), (Vogel, 2002), (Zhang Z. , 2000).

2.1.1.4 Kalay (Sn)

AZ91'e ilave edilen *Sn*, sünek bir yapıya sahip olmakla beraber, *Mg*'a kıyasla oldukça düşük bir ergime sıcaklığına sahiptir ve akıcılığı daha az olan bir elementtir (Aizawa ve Song, 2006). *Sn* içeren alaşımda, soğuma hızına bağlı olarak *Mg₂Sn* intermetalik faz oluşumu gözlenir. *Mg-Sn* denge diyagramına (Baker, 1998) göre soğuma hızının yüksek olduğu durumlarda *Mg* matrisi ile birlikte çubuk tipi *Mg₂Sn* partikülleri gözlenir (Kang ve ark., 2007). Ayrıca ağırlıkça %0,5 *Sn* içeriği ergiyik AZ91 alaşımlarının akışkanlığını artırır (Turen, 2013).

2.1.1.5 Kurşun (Pb)

Mg alaşımlarına ilave edilen *Pb* oldukça iyi bir çözünürlüğe sahip olduğu için; yüksek sıcaklıklarda (ortalama 460 °C) %40'a kadar *Pb* çözünebilir ve ayrı bir faz olarak ortaya çıkmamaktadır. Alaşım sıcaklığının azalmasıyla *Mg₂Pb + α* fazı oluşur. Ayrıca, iyi derecede çözünürlüğe sahip olan *Pb*, intermetalik β -(*Mg₁₇Al₁₂*) fazını inceltmektedir (Balasubramani ve ark., 2007).

2.1.1.6 Toprak Alkali Elementleri (RE)

Mg alaşımlarında RE elementleri akıcılığı artırır ve mikroporoziteyi azaltır. Oda sıcaklıklarında ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi yapabilirler. Ayrıca bu elementler, alaşımın dayanım özelliklerini artırırken aynı zamanda alaşımların artan sıcaklıklarda iyi derecede sürünme dayanımları sayesinde kararlı olan çökeltileri tane sınırlarında ve matriste dağılır. Ayrıca Potasyum (*K*), Sodyum (*Na*), ve Lityum (*Li*) gibi toprak alkali elementleri, alaşımların korozyon özelliklerini de iyileştirir (Barber, 2004), (Polmear, 1989), (Zhang Z. , 2000).

2.1.1.7 Bizmut (Bi)

AZ91'e ilave edilen Bizmut (*Bi*) mikroyapı içerisinde kaba şekilde *Mg₃Bi₂* intermetalik fazını oluşturur (Yuan ve ark., 2001). *Mg₃Bi₂* fazı, tane sınırlarında dağılım gösteren β -(*Mg₁₇Al₁₂*) intermetalik fazına göre daha yüksek ergime derecesine (823 °C) ve termal kararlılığa sahiptir. Ek olarak, β -(*Mg₁₇Al₁₂*) fazının morfolojisini ağ şeklinden partikül şekline dönüştürür ve bu da *Mg* alaşımının güçlendirilmesinde önemli bir rol oynar (Li ve ark., 2011). Bununla birlikte *Bi* ilavesi *Mg₃Bi₂*'nin yapıdaki varlığı alaşımın korozyon potansiyelini artırır (Südholz ve ark., 2009) ve hem anodik hem de katodik reaksiyon hızlarında bir artış meydana getirir (Zhou ve ark., 2009).

2.1.1.8 Antimon (Sb)

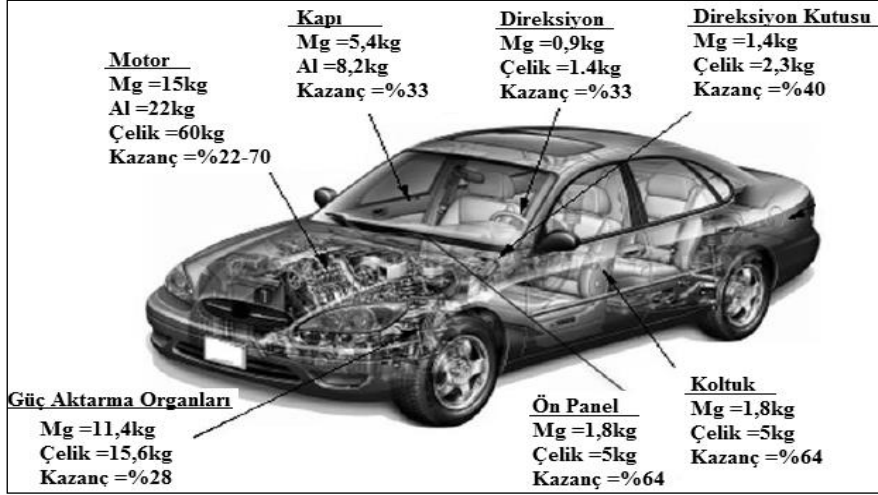
Yüzey aktif bir element olan Antimon (*Sb*)'un *Mg* alaşımlarına ilave edilmesi durumunda alaşımın tane yapısını inceltir (Polmear, 1996) ve tane sınırlarında bileşik oluşumunu destekler (Carbonneau ve ark., 1998). Bu sayede de alaşımın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta mukavemetini artırır (Park ve ark., 1994) ve sürünme özelliği ile birlikte akışkanlığının artmasına da yardımcı olur (Lee ve ark., 1998). *Mg₃Sb₂* fazı yapıda ince çökeltiler halinde bulunur ve genel olarak %0,5 oranında *Sb* içeren alaşımlar oldukça iyi mekanik özellikler sergiler (Elen L. , 2012) (Elen ve ark., 2019).

2.2. Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanları

Günümüzde *Mg* ve alaşımlarına gösterilen en büyük ilgi otomotiv sektörü tarafından olmaktadır. Bunun ilginin nedeni ise, çok hafif olan *Mg* alaşımları sayesinde araç ağırlığı azaltılarak

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

yakıt tasarrufu sağlaması ve bunun paralel olarak araçların gaz emisyonları da azaltılabilecek olmasıdır. Bu yüzden otomotiv endüstrisinde hafif olan metal malzemelere yönelim yalnız günümüzün mevcut otomobilleri ile ilgili değildir. Hidrojen ya da güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarının yakıt olarak kullanılması düşünülen geleceğin yeni nesil otomobillerinde, enerji tasarrufu için hafiflik günümüze kıyasla daha önemli bir gerekliliktir. Şekil 3'te otomobil üretiminde *Mg* alaşımının kullanıldığı yerler gösterilmiştir.



Şekil 3: Otomobil üretiminde *Mg* alaşımından dökülmüş parçalar (Watari, 2006), (Jambor ve Beyer, 1997)

Hava araçlarının imal edilmesinde kullanılan malzemelerde aranan esas özellikler; başta hafiflik olmak üzere, dayanım ve iyi derecede korozyon direncidir. Bununla birlikte bazı özel durum ve kullanım alanları için metallerin sahip olduğu diğer özellikleri de önemlidir. Hava araçları ve sistemlerinin üretimi için çoğunlukla kullanılan metaller ise; Magnezyum, Alüminyum, Bakır ve Titanyumdur (Kaçar ve Öztürk, 2006).

Mg-*Al*-*Mn* elementlerini içeren alaşımlar (AM50 ve AM60 gibi) iyi uzama özelliğine ve yüksek darbe dayanımı özelliklerine sahiptirler (Vogel, 2002). *Mg*-*Al*-*Si*-*Mn* (AS41 ve AS21 gibi) ve *Mg*-*Al*-*Re* (AE42) alaşımları, *Mg*-*Al*-*Mn* ve *Mg*-*Al*-*Zn*-*Mn* alaşımlarına kıyasla daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçalarının üretiminde daha fazla tercih edilir (Zhang Z. , 2000).

Mg alaşımlarında sürünme direncini (150 °C'ye kadar) arttırmak için AS41 (%4,2 *Al*, %1 *Si*, %0,35 *Mn*) basınçlı döküm ile üretilen alaşımı geliştirilmiştir (Zhang Z. , 2000). AS41 alaşımının dayanımı, alaşımda ortaya çıkan Mg_2Si fazının hızlı katılaşma neticesinde ince taneli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple AS serisi alaşımlar dayanım gerektiren yerlerde kullanılan *Mg* alaşımlarıdır.

Havacılık endüstrisinde kullanılan standartlar ASTM, EN, DIN, AFNOR standartlarında var olmasına rağmen, son yıllardaki önemli ve hızlı gelişmeler sebebi ile havacılık endüstrisi üretici firmalar tarafından çeşitli *Mg* alaşımları geliştirilmiştir (Davis, 1998), (Mordike ve Kainer, 1998). Firmalar tarafından geliştirilen bu alaşımların bileşimleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Ticari firmalar tarafından geliştirilen Mg alaşımları (ASTM B80) (Davis, 1998)

Alaşım	Alaşım elementleri (%)							
	Zn	RE	Y	Zr	Ag	Cu	Ne	Mg
RZ5	3,5-5	0,8-1,7	-	0,4-1	-	-	-	Kalan
WE43	-	2,4-4,4	3,7-4,3	0,4 min.	-	-	-	Kalan
MSR-B	-	2-3	-	0,4-1	2-3	-	-	Kalan
EQ21	-	1,5-3	-	0,4-1	1,3-1,7	0,05-0,1	-	Kalan
WE54	-	1-2	4,75-5,5	4 min.	-	-	1,5-2	Kalan

RZ5 alaşımı, toprak alkali (RE) elementleri, zirkonyum ve çinko elementi içeren döküm Mg alaşımlarıdır. Sahip olduğu düşük öz kütle ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle helikopterlerin vites iletim ve pervane motorlarının üretimlerinde tercih edilen önemli bir alaşımdır. Ayrıca bu alaşım oldukça gelişmiş korozyon özelliklerine sahiptir (Mordike ve Kainer, 1998).

WE43, yüksek mukavemet ve korozyon dayanımının yanı sıra yüksek sıcaklıklarda bile uzun süre dayanım gösteren özelliklere sahip olan Mg esaslı alaşımdır. WE43 alaşımları, uçak motorları, helikopter vites kutuları ve yüksek performans gerektiren araçlarda kullanılmaktadır (Mordike ve Kainer, 1998) (Eliezer ve ark., 1998). Şekil 5'te WE43 alaşımından dökülmüş parçalar görülmektedir.



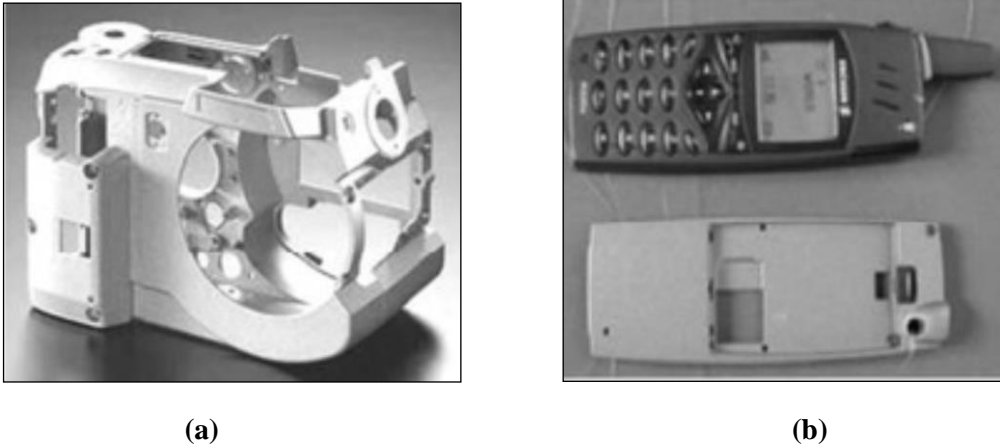
Şekil 4: WE43 alaşımından dökülmüş helikopter vites kutusu (Mordike ve Kainer, 1998), (Zaludová, 2005)

Gümüş ve nadir toprak elementleri içeren MSR alaşımları, yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanımları sayesinde en çok kullanılan Mg alaşımlarıdır. Özellikle hava araçlarının motor ve vites kutuları dökümünde kullanılır (Mordike ve Kainer, 1998), (Eliezer ve ark., 1998).

Bileşiminde RE elementleri ve MSR alaşımından daha az miktarda Ag içeren EQ21, yüksek sıcaklıklarda ki çalışma şartlarının bulunduğu ve yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Hava araçları, otomobil ve askeri alandaki uygulamalarda kullanılmaktadır (Mordike ve Kainer, 1998), (Eliezer ve ark., 1998).

Süper hafif (Mg-Li) alaşımlar, bilgisayar ve elektronik cihaz parçaları olarak plastik vb. özellikteki malzemelerin yerine kullanılabilir (Kazdal, 1999) (Dobrzanski ve ark., 2007). Şekil 6'da Li içeren Mg alaşımından dökülmüş cep telefon kutusu ve kamera görülmektedir.

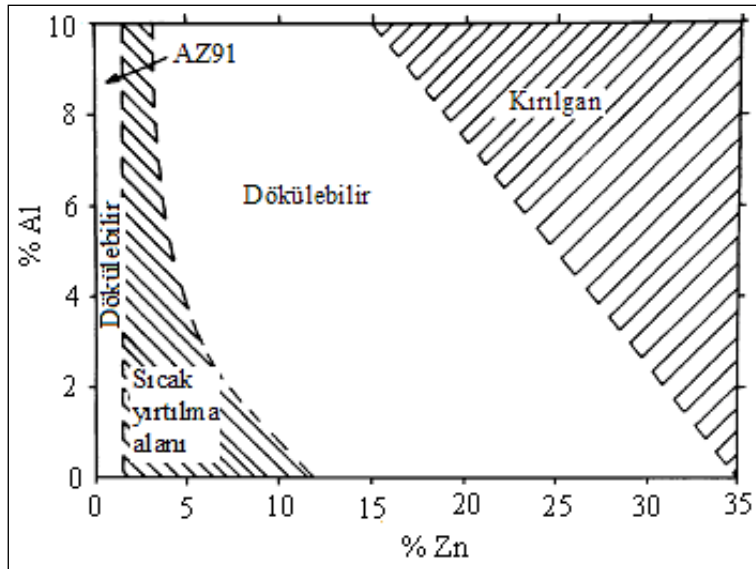
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



Şekil 5: Li ilaveli Mg döküm parçalar a) kamera kutusu, b) cep telefonu kutusu (Dobrzanski ve ark., 2007)

2.2.1. AZ91 Alaşımı

Mg-Al-Zn alaşım sistemi, Mg döküm alaşımlarında önemli bir yer tutar. Keşfi 1913 yılına dayanan bu üçlü alaşım sistemi sonraki yıllarda araştırmacılar tarafından üzerinde çok çalışmalar yapılmış ve geliştirilmiştir (Zhang Z. , 2000), (Zhang ve ark., 2006). Şekil 7’de Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirliği için uygun olan aralıkları verilmiştir.

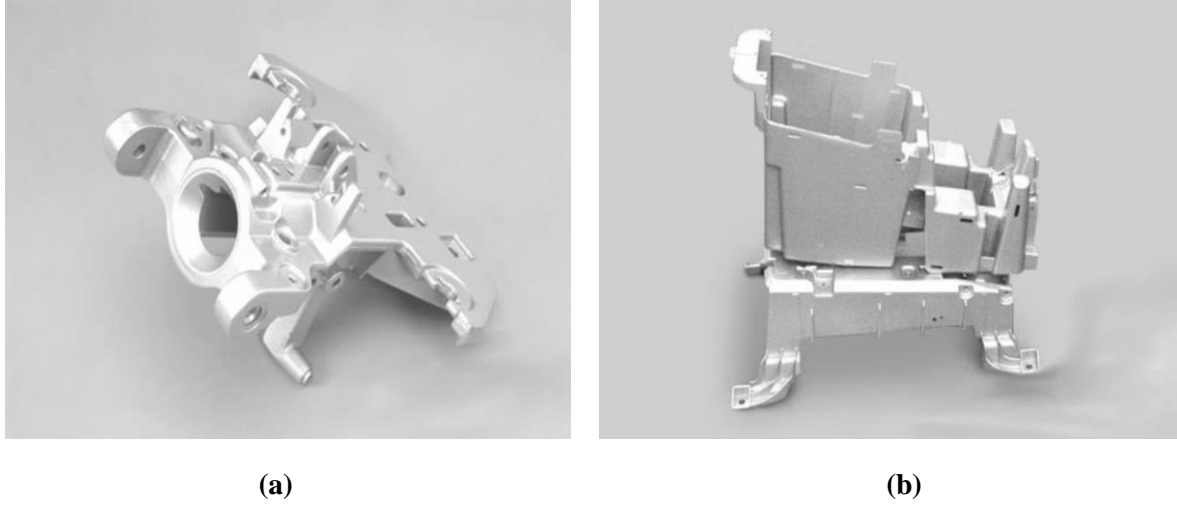


Şekil 6: Mg-Al-Zn üçlü alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik gösterimi (Polmear, 1989), (Zhang ve ark., 2006), (Zhang ve ark., 1998)

AZ91 (%9 Al, %0,7 Zn, %0,2 Mn) ve AM60 (%6 Al, %0,2 Mn) gibi alaşımlar en çok kullanılan Mg alaşımlarıdır. Bu alaşımlar; iyi dökülebilirlik, iyi mekanik özellik ve iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Fakat, bu alaşımlar düşük sürünme dirençlerinden dolayı 120 °C üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmazlar (Zhang Z. , 2000), (Mordike ve Kainer, 1998).

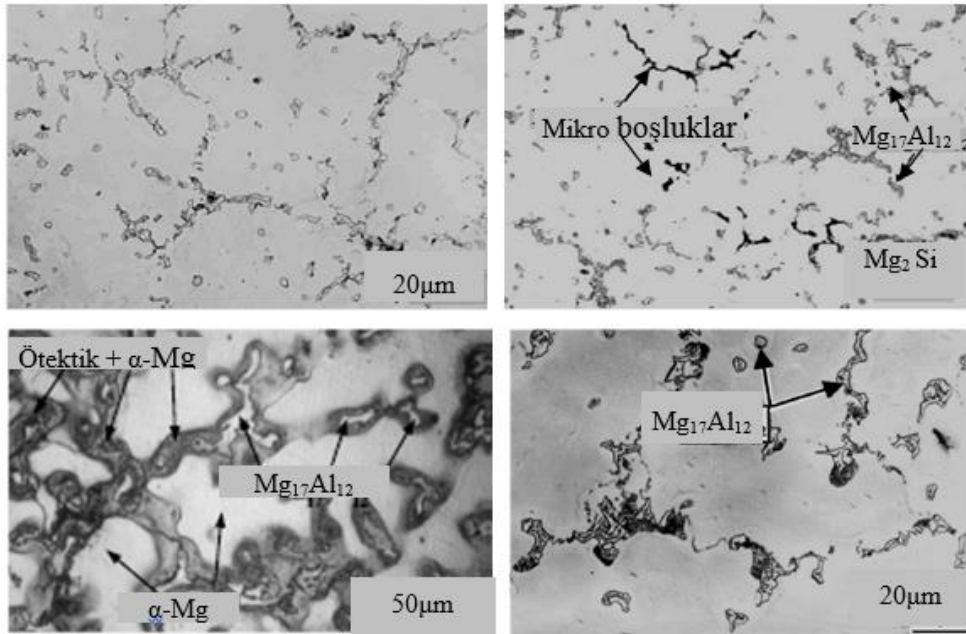
AZ91 alaşımları, daha çok otomobil parçalarının dökümünde kullanılan alaşımlardır. Diğer Mg alaşımlarıyla kıyaslandığında; AZ91 alaşımı daha iyi döküm ve daha fazla dayanım özellikleri sergilemektedir. AZ serisi alaşımlar, başta otomobil endüstrisi olmak üzere, havacılık, bilgisayar ve mobil telefonlarda kullanılan önemli bir alaşımdır (Kazdal, 1999). Şekil 4’te AZ91 alaşımından dökülmüş ürünler görülmektedir.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



Şekil 7: AZ91 alaşımı döküm parçaları (a) Direksiyon Kolonu Braketi, (b) Orta Konsol (Atalay, 2006), (Corp., 2006)

Mg-Al alaşımlarında elemental olarak Zn/Al oranı 1/3 oranını aşması durumunda mikroyapıda üçlü Mg-Al-Zn fazı ortaya çıkar (Mordike ve Kainer, 1998). Bu fazın oluşumu ve alaşımın mevcut denge katılaşma durumları ikili Mg-Al denge diyagramı ile anlaşılabilir (Şekil 1). AZ91'in dengeli bir şekilde katılaşması, birincil olan magnezyum α -(Mg), katı eriyik çekirdeklenmesi ile yaklaşık olarak 600 °C'de başlar. Bu çekirdekler büyümeye devam eder ve katılaşma yaklaşık 470 °C'de son bulur (Barber, 2004), (Zhang Z. , 2000). α -(Mg) ve β -(Mg₁₇Al₁₂) fazından oluşmuş ayrı olarak ötektik bir yapı mikroyapıda oluşmaya başlar. Böylelikle denge dışı AZ91'in mikroyapısı α -(Mg) ve β -(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazından oluştuğu anlaşılır. Şekil 5'te AZ91 alaşımı mikro yapılarının genel görünümü gösterilmektedir.



Şekil 8: AZ91 alaşımının mikroyapısı (Qudong, ve ark., 1999)

Mg ve alaşımlarında farklı döküm yöntemleri kullanılabilir. Ancak kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerin kaba tane boyutu, basınçlı döküm ile üretilmiş olan ürünlerin yaklaşık olarak 10 katı kadarına ulaşabilir. Bu durum hızlı soğumanın etkisiyle oluşur ve ergiyik çok sayıda çekirdeklenme oluşturur. Ayrıca tane sayısında artışı, kalıbın dolumu esnasında ince tanelerin

oluşumuna yardımcı olur. Enjekte edilen ergiyiğin sahip olduğu yüksek hızı nedeniyle ergiyikte türbülans oluşturur. Bu türbülans ise, kalıp yüzeyinde henüz daha çekirdeklenmemiş dendrit yapıların kırılmasına neden olur ve bunun sonucunda da tane sayısı artış gösterir. Bundan başka, diğer döküm teknikleri kullanılarak kalıp boşluğu çok hızlı şekilde doldurulduğunda, meydana gelen damlacıklar yeni çekirdeklenme yüzeyleri oluşturabilmektedirler (Zhang Z. , 2000).

2.3. Magnezyum Alaşımlarının Ergitilmesi ve Dökümü

Mg alaşımları genellikle, dışarıdan ısı uygulamalı bir çelik (<%0,12C) potada ergitilir. *Mg* döküm sıcaklığında (650 °C) çelikle çok yavaş reaksiyona girdiği için ergitme işleminde çelik pota çok yaygın olarak kullanılır. Ergiyik *Mg* için yaygın olan uygulama, metali aynı anda ergitme ve potadan dökmektir. Kalıp malzemesi ise daha çok demir esaslı malzemelerden tercih edilir. Bunun sebebi; demirin ergiyik *Mg* alaşımı ile temasında çok daha az miktarda çözündüğü ve ergiyik *Mg*'un kalıba yapışma eğiliminin *Al* alaşımlarına kıyasla daha az oranda olmasıdır. Bu sayede kalıp ömrü, *Al* parçaların dökümüne kıyasla 2-3 kat daha uzundur.

Ancak ergiyik haldeki *Mg* ve alaşımları normal şartlarda ki hava ortamında oksitlenme ve yanma eğilimindedirler. Önlem alınmadığı takdirde *Mg* oksitlenme ve yanma kaybı ortaya çıkar. Ergimiş *Mg* alaşımları *Al*'a göre farklı davranış sergiler. Ergiyik üzerinde ince bir film tabakası şeklinde toplanan oksijen geçirgenlik gösterir ve oksitlenme bu şekilde artar. Bu durum oksijenin içeriye nüfuz etmesini ve oluşan oksit tabakası altında yanmanın oluşmasına sebep olur. Oksitlenmenin önlenmesi için metalin ergitilmesinde ve dökümünde koruyucu gazlar kullanılır. *Mg* alaşımının hem ergitilmesinde hem de dökümünde koruyucu olarak kullanılan gazlar başta *Ar* ve *N* olmak üzere SF_6 ve HFC-134a gazlarıdır. Korumasız ya da zayıf koruma neticesinde döküm parça içindeki cüruf vb. kalıntıları, korozyon direncini düşürmektedir. Genellikle SF_6 içeren çeşitli gaz karışımları sıvı *Mg*'u korumak için daha çok tercih edilmektedir. Standart koruyucu gaz karışımları için aşağıda üç örnek verilmiştir (Kazdal, 1999), (Hillis, 2002).

- 1) AZ91 650-725 °C → Hava+%2 SF_6
- 2) AZ91 650-725 °C → %75 Hava+%25 CO_2 +%0,2 SF_6
- 3) AZ91 650-725 °C → %50 Hava+%50 CO_2 +%0,3 SF_6

Mg alaşımlarının ergitilmesinde özel olarak tasarlanarak hazırlanmış ergitme ocakları kullanılmaktadır. Bu çalışmada bahsi geçen alaşımların ergitme işlemi bu tip özel ocaklarda atmosfer ortamı ile tamamen teması kesilmiş olarak ve koruyucu gaz altında yapılmıştır.

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

3.1. Homojenleştirme Isıl İşlemi

Yayınım (difüzyon) da denilen homojenleştirme işlemi, iç yapıda döküm sonrası ortaya çıkabilecek muhtemel kimyasal bileşim farklılıklarının, yüksek sıcaklık ve sürelerde yayınma yoluyla dengelenmesi işlemidir. Denge diyagramında tek fazlı yapı sıcaklıklarına ısıtılıp ve 6-48 saat gibi uzun süreler bekletilerek gerçekleştirilir.

Metal malzemelerde döküm sonrasındaki primer yapısı, genelde dendritik yapıdadır ve büyük ölçüde bileşim farklılıklarının varlığı nedeni ile yapıda homojensizlik vardır. Homojenleştirme işlemindeki amaç ise, bu dendritik yapıdaki bileşim farklılıklarını giderilmesi, katılaşma esnasında meydana gelen dengesiz fazların çözündürülmesi ve dökülmüş parçada ekstrüzyon parametrelerinin olumlu yönde etkileyen denge parçacıklarının oluşturulmasıdır. Karmaşık olan alaşım sistemlerinde ise, dengesiz bileşiklerin yanında malzemenin sünekliliğini azaltan çözünmez denge fazlarda bulunur. Homojenleştirme işlemi sayesinde bu fazların yuvarlaklaşması sağlanarak süneklilik artırılır (Şendeniz, 2006).

3.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi

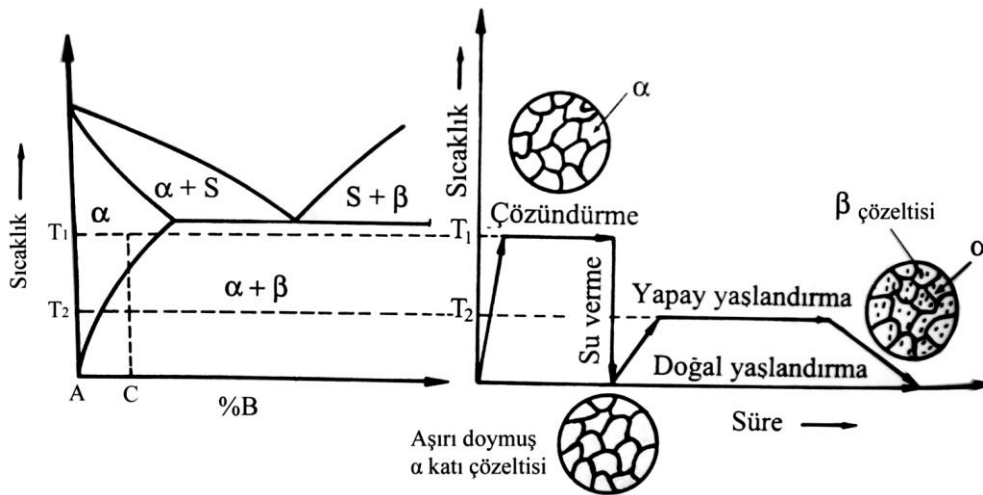
Yaşlandırma ısıl işlemi, sünek ve yumuşak matriste; matrisle uyumlu ince ve sert çökeltilerin oluşumunu sağlamak amacıyla uygulanır (Askeland, 1998). Matris içerisinde uygun bir şekilde dağılan çökeltiler, dislokasyonların hareketlerini engelleyerek, alaşımın mukavemet değerlerinde artışa neden olurlar. Yaşlandırma işlemi ile, Mg alaşımlarının dışında, bakır ve ısıl işlem uygulanabilen Al alaşımları gibi alaşımların sertleşmesi sağlanır ve dayanımları artırılır. Yaşlandırma ısıl işlemi, üç aşamadan meydana gelmektedir;

(a) Solüsyona alma ısıl işlemi

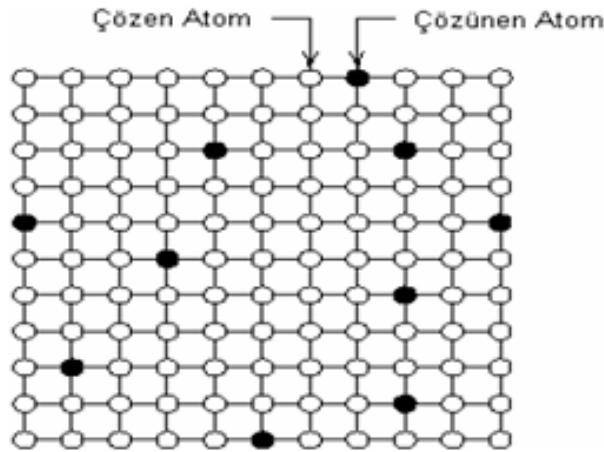
Sıvı halde her oranda çözünebilen, katı halde ise kısmen çözünen yapıya sahip bir alaşım (Şekil 5), tek fazlı bir yapı (α) elde etmek için, alaşımın denge diyagramında belirtilen, solvüs eğrisinin üzerindeki, T1 (420 °C) sıcaklığına kadar (Şekil 9) ısıtılıp bu sıcaklıkta alaşımdaki mevcut fazların (α ve β) tek faz içerisinde çözünmesi sağlanıncaya kadar bekletilir. Bekletme süresi, alaşımların bileşimine göre farklılık gösterir. Bu işleme çözüldürme ya da solüsyona alma ısıl işlemi denir (Savaşkan, 1999), (Öz, 2007).

(b) Su verme

Su verme işlemi, solüsyona alma işlemi sonrasında oluşturulan tek fazlı (α) katı çözeltisini, çökeltilerin ana faz içerisinde tekrar oluşmasına izin vermeyecek kadar, mevcut T1 sıcaklığından çok hızlı bir şekilde soğutma işlemidir (Şekil 9). T1 sıcaklığındaki malzemenin, ani olarak bir sıvı içerisinde soğutulması ile aşırı doymuş bir yapı meydana gelir. Aşırı doymuş bu yapı, malzeme içerisinde bulunan çözenin (Şekil 10) (örneğin Al alaşımlarında çözen Al, Mg alaşımlarında çözen Mg dur), denge koşulları içerisinde, alaşım elementinin çözüdürebileceği miktarın daha da fazlasını çözmesi anlamına gelir ve bu durum kararsız bir durumdur. Kararlı bir yapının oluşması için, orta dereceli dayanıma ve kayda değer sünekliğe sahip bu yapının yaşlandırılması gerekir. Su verme işleminin ardından tekrar ısıtılarak gerçekleştirilen yaşlandırma işlem uygulamasına yapay yaşlandırma, oda sıcaklığında kendiliğinden olan yaşlandırma işlem uygulamasına da doğal yaşlandırma adı verilir (Savaşkan, 1999).



Şekil 9: Çözüldürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesinin şekli (Savaşkan, 1999).



Şekil 10: Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı (Savaşkan, 1999)

(c) Çökeltme sertleşmesi

Yaşlandırmanın ısı işleminin ilk aşamasında, aşırı doymuş yapı içerisinde kalan fazlalık atomlar kümeleşir ve sonraki aşamalarda, çekirdeklenme mekanizmasının devreye girmesiyle, β fazının (çökelti) çekirdeklerini oluşturur (Şekil 10) (Savaşkan, 1999). Çökeltme sertleşmesinin oluşumu, matris içerisinde, çözünen atomların oluşturduğu uyumlu çökeltilere bağlıdır. Uyumlu çökelti oluştuğunda, düzlemler arası (çökelti kafesinin atom düzlemleri ile matris kafesinin düzlemleri arasında) süreklilik oluşur. Süreklilik oluşumu ise, çökelti etrafında geniş bir gerilme alanı meydana getirir ve bu alan içerisinden geçen dislokasyonların da hareketleri zorlaşır (Askeland, 1998). Dislokasyon hareketlerinin engellenmesi sonucunda da alaşımın sertliği ve mukavemeti önemli derecede artmış olur. Ancak, aşırı yaşlandırma gerçekleşirse, çökelti daha fazla büyüyerek, matristen bağımsız bir şekilde kendi kristal yapılarını oluşturur ve bunun sonucunda kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz bir yapı oluştururlar. Bu durumda malzemenin mukavemet değerlerinde düşüşe sebep olur.

Endüstriyel ultra-hafif alaşımların çoğu, magnezyum bakımından zengin ve yaygınlığı sıcaklığa bağlı bir eriyik içerir. Dolayısıyla bu alaşımların mekanik özelliklerinde, su verme ve çökeltme işlemlerinin uygulanması ile iyileşme olanağı vardır. İlâveten ısı işlemler, Al esaslı hafif alaşımlarda gösterdikleri etkinliği tamamıyla gösteremedikleri için daha az genelleşmişlerdir. Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarına, aşağıda gösterilen sınırlar dahilinde ısı işlem uygulanabilir:

Mg-Al alaşımları: $\%7 < Al < \%12$

Mg-Al-Zn alaşımları: $\%7 < Al + Zn < \%13$ ve $Al \geq \%5$

Belli bir Mg_4Al_3 bileşimindeki kristallerin tam katı eriyik haline getirilebilmesi için yeteri kadar yüksek bir sıcaklıkta uzun süre ısıtıldıktan sonra alaşım havada soğutulursa soğuma hızı, pratik olarak, fazla doymuş olan katı eriyiği genellikle oda sıcaklığında tutmak yeterlidir ve alaşım homojenleşmiş (stabil) durumdadır denir. Homojenleştirme işleminin sonuçları R ve A'nın belirgin bir artışı, yorulma sınırının artması ve elastik sınırla sertliğin bir miktar artması şeklinde olur (Oğuz, 1990).

Önceden homojenleştirilmiş (stabilize edilmiş) olan alaşımın $150\text{ }^\circ\text{C}$ civarında uzun süreli bir menevişe tâbi tutulması durumunda katı eriyik ayrışarak aşırı doymuşluk halinde bulunan Mg_4Al_3 bileşim kısmının iç yapısal çökmesi gerçekleşir ve alaşım tavlanmış haldedir denir. Bu tamamlayıcı işlem elastik sınır ve sertlikle birlikte kopma mukavemetini daha da artırır. Ancak kopma uzaması ve yorulma sınırı değerleri düşer ve hatta döküm parçalarda döküm haldekinin altına bile inebilir.

Yukarda bahsedilen ısı işlemler, üç temel başlığa indirgenir: Bunlar eriyik ısı işlemi, çökeltme veya yaşlandırma ve de tavlama'dır. Bunlara ek olarak homojenleştirme ve gerilim giderme işlemleri de uygulanmaktadır. Eriyik ısı işlemi, yapı içerisindeki bazı bileşenlerin eriyik hale gelecek

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

bir sıcaklığa kadar alaşım malzemesini ısıtıp, bunları soğuma esnasında eriyik halde tutmak üzere daldırmaktan ibarettir.

Farklı bileşimlere sahip Mg alaşımlarının, Al gibi sertleştirme ve yaşlandırma ile mukavemetleri artırılabilir. Fakat alaşımların mukavemetlerini artırabilme kabiliyetleri, bileşenlerinin (Zn, Al, Zr vb) belli sıcaklıkta Mg içinde eriyebilirlik yeteneklerine bağlıdır. Isıtma işlemi, fazla fazların (MgZn₂, Al₃Mg₃, Mg₃Al₂Zn₂, vb.) eritilmesini sağlar. Sertleştirmeden sonra bir fazlı doymuş bir katı eriyik elde edilir. Daha sonrada alaşımı pekiştirici fazlar, yaşlandırma işleminde çöklerler. Mg alaşımlarının diğer bir özel niteliği ise, difüzyon sürecinin yavaş olması sebebiyle faz dönüşümleri de yavaş olur. Bu durum, sertleşme için zaman aralığı 4-24 saat iken yapay yaşlandırma için ise 16-24 saat aralığında uzun tutma sürelerini gerektirir.

Döküm alaşımları genel olarak (T1) 200-300 °C'de yaşlandırılırlar. Oksitlenmeyi önlemek için, ısıtma işlemi %0,7-1,0 SO₂'li hava atmosferinde yürütülür. Mg ve alaşımları, oda sıcaklığında oldukça yavaş bir şekilde yaşlanma sertleşmesine uğrarlar. Azami derecede mukavemet artışı elde edebilmek için, sertleştirme sonrası 175-200 °C aralığında bir yapay yaşlandırma takip eder.

Homojenleştirme, yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında döküm alaşımlarındaki şişmeyi önlemek veyahut en aza indirmek için uygulanan bir işlemdir. Şişme, temel olarak katı eriyikten çökelmiş olan bileşenlerin bir arada toplanmalarından ortaya çıkan hacimsel değişimdir. Homojenleştirme ayrıca, gerilim giderme ve sürünme dayanımını artırma etkisi vardır.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

Tablo 5'te AZ91 alaşımı ve alaşıma ilave edilen elementlerin % miktarları verilmiştir.

Tablo 5: Deneilerde kullanılan alaşımların analiz sonuçları

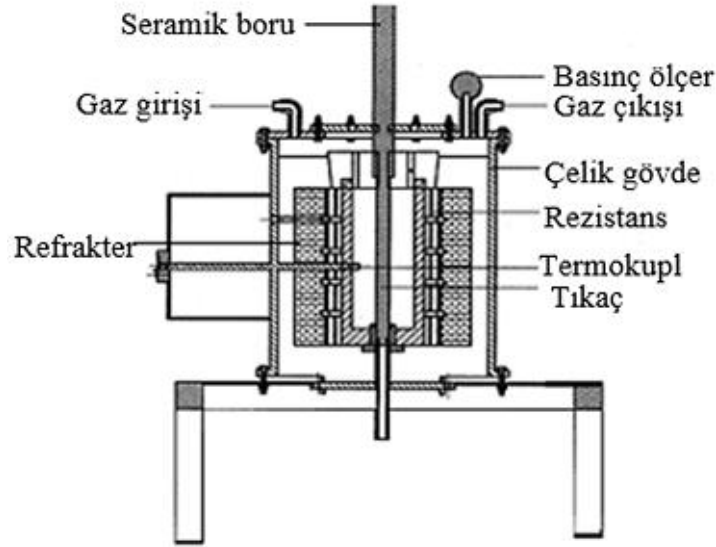
Bileşim	% Element miktarları						
	<i>Al</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>Bi</i>	<i>Sb</i>	<i>Diğer</i>	<i>Mg</i>
AZ91	9,11	0,76	0,16	-	-	0,021	Kalan
AZ91+%0,2 Bi	9,20	0,75	0,18	0,21	-	0,018	Kalan
AZ91+%0,5 Bi	9,25	0,77	0,19	0,53	-	0,018	Kalan
AZ91+% 1 Bi	9,17	0,71	0,17	1,03	-	0,011	Kalan
AZ91+%0,2 Sb	9,21	0,76	0,18	-	0,19	0,017	Kalan
AZ91+%0,5 Sb	9,18	0,74	0,17	-	0,51	0,015	Kalan
AZ91+%1 Sb	9,15	0,69	0,19	-	1,02	0,0012	Kalan

Deneilerde, AZ91 alaşımının hazırlanmasında %99,8 saflıkta Mg ve Al kullanılmıştır. AZ91 alaşımına *Bi* ve *Sb* elementler ilave edilerek ön alaşımlar hazırlanmıştır. Daha sonra ikinci bir ergitme yapılarak dökümler gerçekleştirilmiştir.

4.2. Ergitme ve Döküm

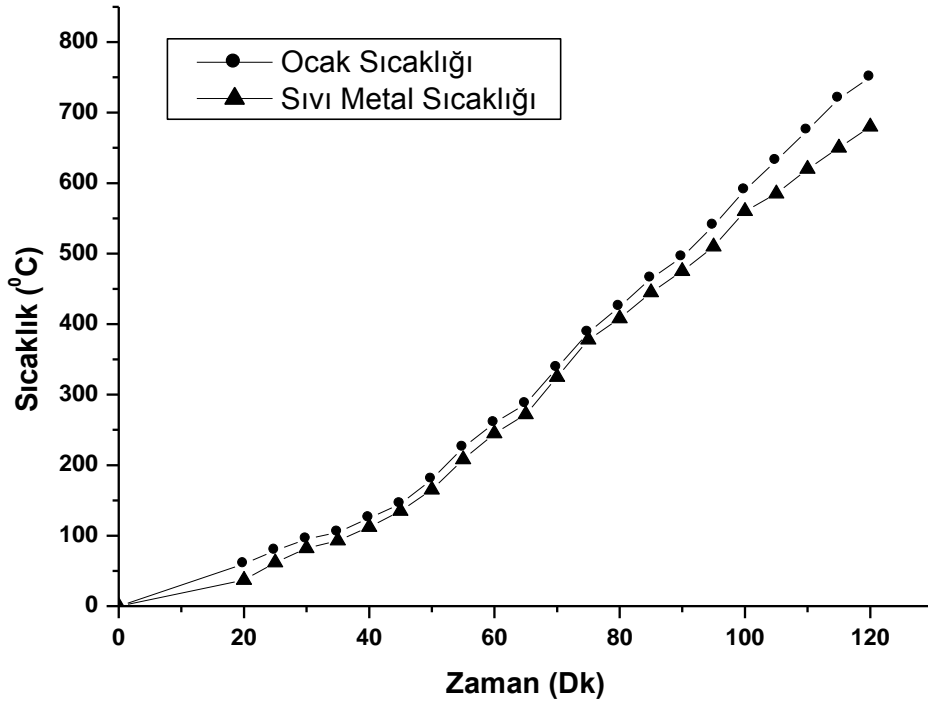
Ergitme işlemlerinin yapıldığı fırının (Şekil 11) iç yüzeyi refrakter tuğla ile kaplanmış ve ergitme işleminde kapasitesi yaklaşık olarak 2 Kg olan mobil paslanmaz çelik döküm pota kullanılmıştır. Ergitme esnasında da ocak atmosferinin kontrolü için koruyucu gaz olarak Argon kullanılmıştır.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



Şekil 11: Deneylerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi.

Ocak içerisinde ve metalde sıcaklık değeri 750 °C olacak şekilde takip edilmiştir. Ergime sıcaklığına ulaşıldıktan sonra yaklaşık 1 saat bekletilerek alaşımın döküm sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Ocağın ve sıvı metalin sıcaklık dengesi Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12: Ocak ve sıvı metalin sıcaklık grafiği

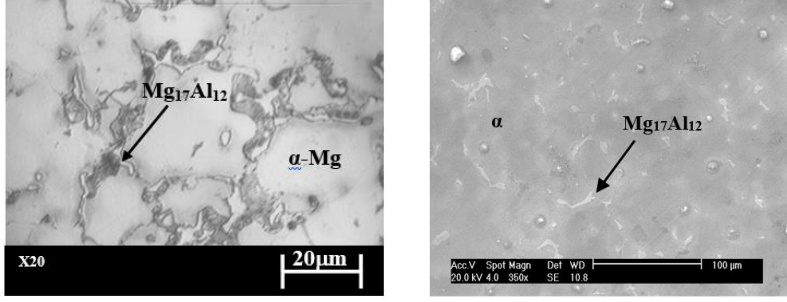
4.3. Kalıp

Dökümler yerçekimi kuvvetinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığına varan eriyik; pota ortasında bulunan döküm yolunun açılması ve yerçekimi etkisi ile Şekil 13’te kesiti görülen kalıba aktarılmıştır. Kalıp malzemesi olarak AISI 1040 kalite çelik malzeme kullanılmış ve kalıp iç yüzeyi Ra 2.5 hassasiyetinde işlenmiştir. Döküm öncesi kalıp ani soğuma hatalarını en aza indirmek adına 250 °C sıcaklığa kadar klasik bir fırında ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.

5.1. Mikroyapı Sonuçları

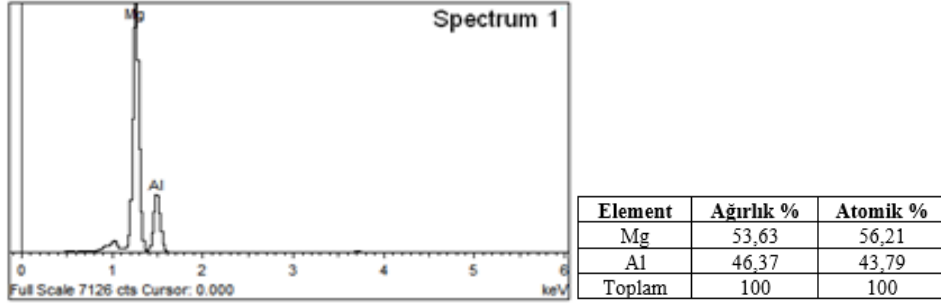
5.1.1. Isıl İşlem Öncesi

AZ91 ve alaşımlarının ısıl işlem öncesi optik mikroskop (OM) görüntüsü, SEM ve EDS analizleri aşağıda verilmiştir.



(a)

(b)

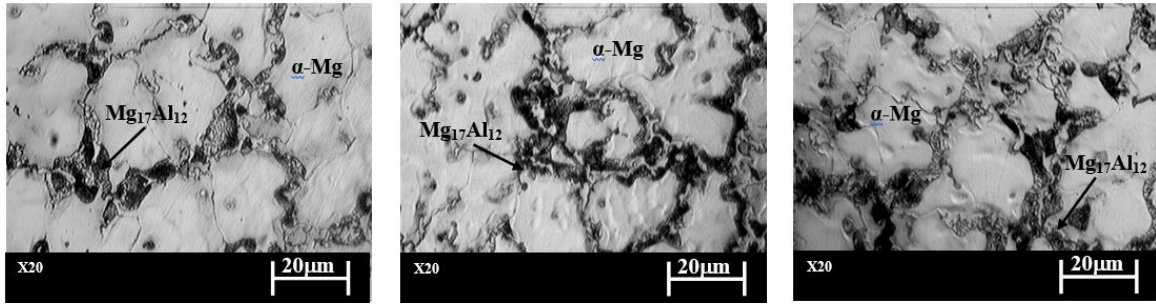


(c)

Şekil 14: AZ91 alaşımlarının (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) SEM görüntüsü (c) EDS analizi.

AZ91 alaşımlarının mikroyapısı (Şekil 14) incelendiğinde, yapının genelde α -Mg matris fazından oluştuğu ve bununla birlikte dendirit oluşumu gözlenmiştir. Tane sınırlarından alınan noktasal EDS analizi Al ve Mg elementlerinin ve tane sınırlarında ki β -($Mg_{17}Al_{12}$) varlığını ortaya çıkarmıştır.

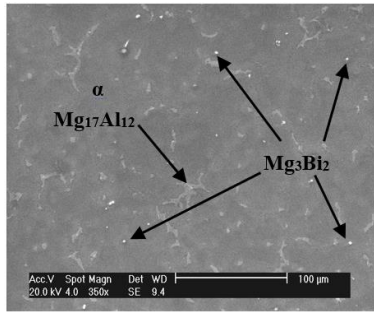
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



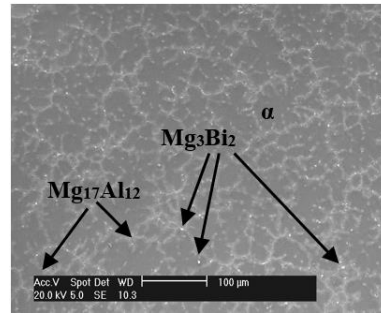
(a)

(b)

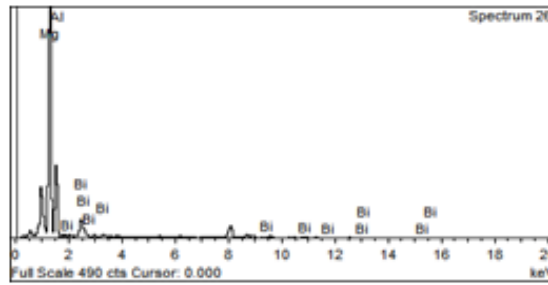
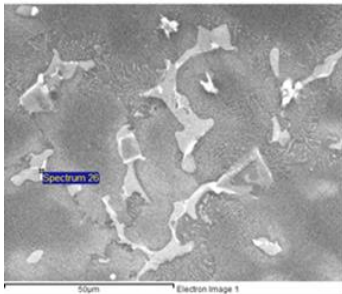
(c)



(d)



(e)



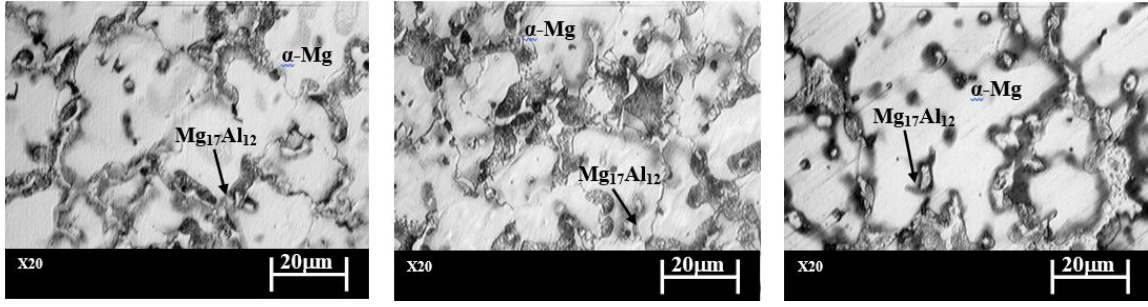
Element	Ağırlık %	Atomik %
Mg	49,81	63,95
Al	28,35	32,79
Bi	21,84	3,26
Toplam	100	100

(f)

Şekil 15: AZ91+Bi alaşımlarının (a), (b) ve (c) sırasıyla %0,2, %0,5 ve %1 Bi alaşımlı AZ91'in optik mikroskop görüntüleri, (d) ve (e) sırasıyla %0,2 ve %1 Bi alaşımlı AZ91'in SEM görüntüleri, (f) %1 Bi alaşımlı AZ91'in EDS analizi.

AZ91 alaşımına *Bi* ilavesiyle mikroyapıda belirgin bir değişim gözlenmektedir. Alaşımda artan *Bi* miktarı ile birlikte yapıda β-(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazının oluştuğu ve bu faz çevrelerinde ötektik fazın belirgin hale geldiği gözlenmiştir. (Şekil 15(f))'te görüldüğü üzere yapılan noktasal EDS analizi sonucu Mg, Al ve bu elementlere ilave olarak *Bi* elementinin varlığı gözlenmiştir olup buna bağlı olarak Mg₃Bi₂ fazının da oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca %0,2 *Bi* alaşımında (Şekil 15 (d)) Mg₃Bi₂ fazı az miktarda fakat toplanmış halde olduğu ön görülmekte olup *Bi* miktarı %1'e ulaştığında toplanma azalırken faz sayısının çoğaldığı düşünülmektedir. (Şekil 15 (e)) incelendiğinde Mg₁₇Al₁₂ ve Mg₃Bi₂ fazları *Bi* miktarı %1'e ulaştığında tane sınırının yakınında toplanmaya ve çoğalmaya başladığını literatürde benzer çalışmalar da desteklemektedir.

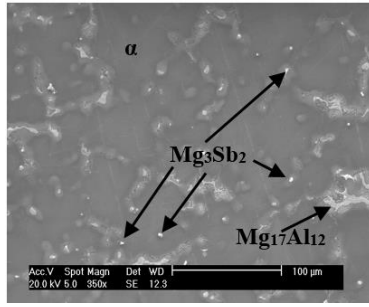
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ



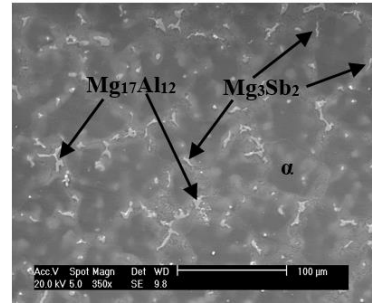
(a)

(b)

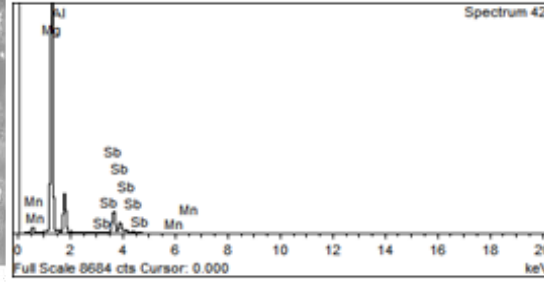
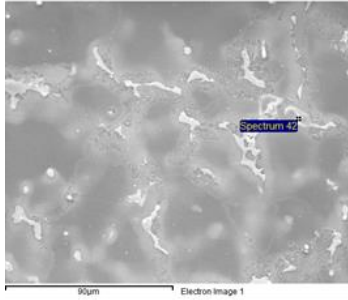
(c)



(d)



(e)



Element	Ağırlık %	Atomik %
Mg	68,55	89,50
Al	2,52	2,96
Sb	28,94	7,54
Toplam	100	100

(f)

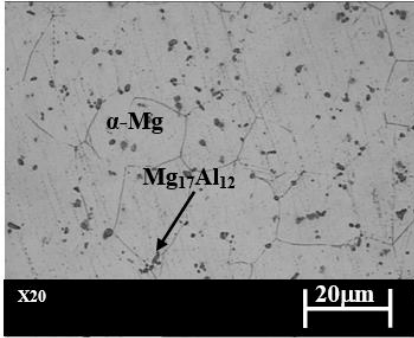
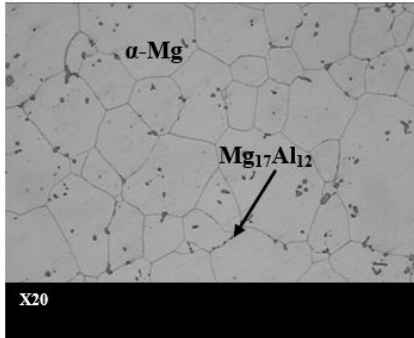
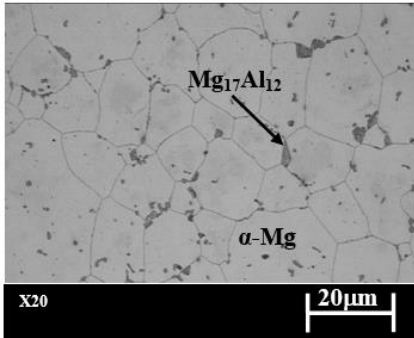
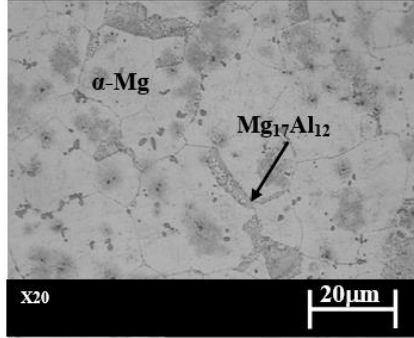
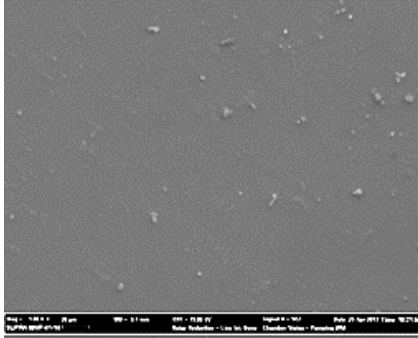
Şekil 16: AZ91+Sb alaşımlarının (a), (b) ve (c) sırasıyla %0,2, %0,5 ve %1 Sb alaşımlı AZ91'in optik mikroskop görüntüleri, (d) ve (e) sırasıyla %0,2 ve %1 Sb alaşımlı AZ91'in SEM görüntüleri, (f) %1 Sb alaşımlı AZ91'in EDS analizi.

Şekil 16 incelendiğinde AZ91 alaşımına *Sb* ilavesiyle mikroyapı değişiminde etkili olduğu gözlenmiştir. Alaşımda *Sb* miktarı %1'e ulaştığında ise birlikte tane sınırlarında oluşan β -($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalik fazının parçalandığı (Şekil 16 (c)) gözlenmiştir. Yapılan noktasal EDS analizi sonucu Mg, Al, Mn ve bu elementlere ilave edilen *Sb* elementinin varlığı gözlenmiştir. Ayrıca Mg_3Sb_2 fazının da oluştuğu düşünülmektedir. *Sb* miktarı %1'e ulaşan alaşımlarda Mg_3Sb_2 'nin hacim fraksiyonunda artışla birlikte ağ örgüsünde de artış gösterdiği ve tane inceltici etki gösterdiği literatürde de desteklenmektedir.

5.1.2. Isıl İşlem Sonrası

AZ91 ve alaşımlarının ısıl işlem öncesi optik mikroskop (OM) ve SEM görüntüsü, aşağıda verilmiştir.

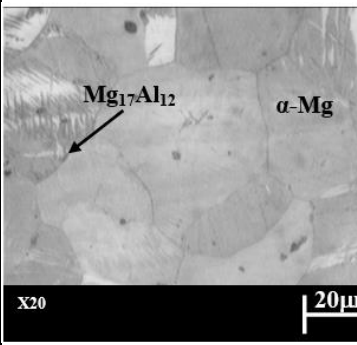
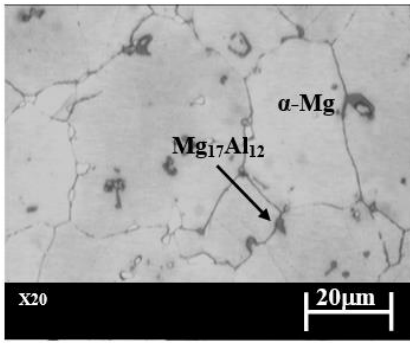
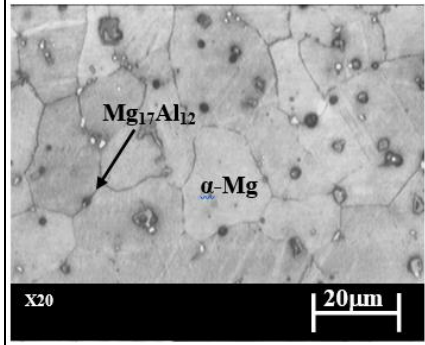
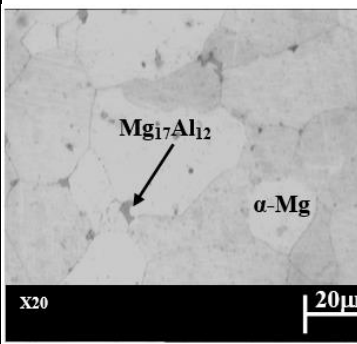
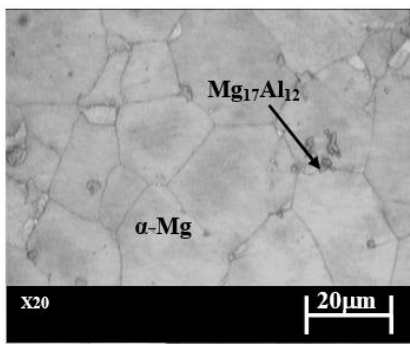
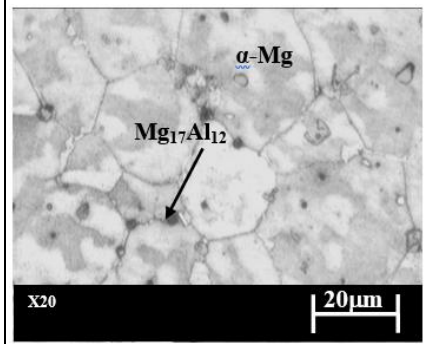
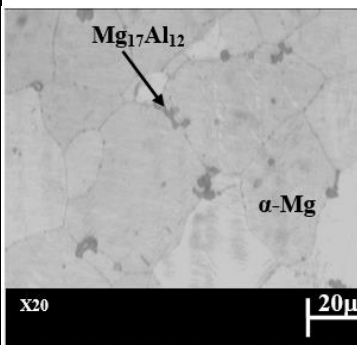
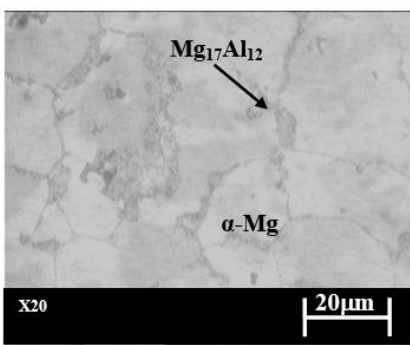
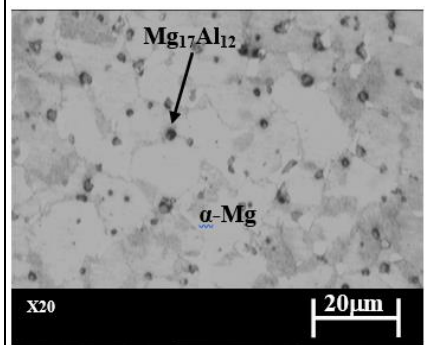
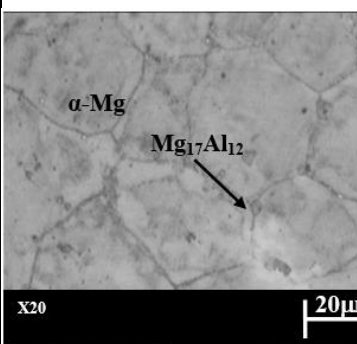
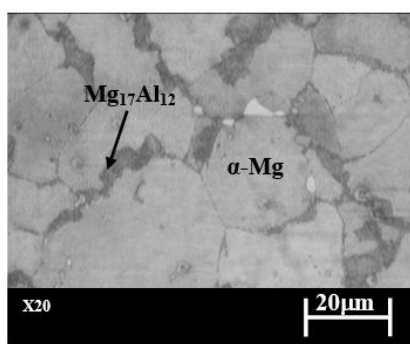
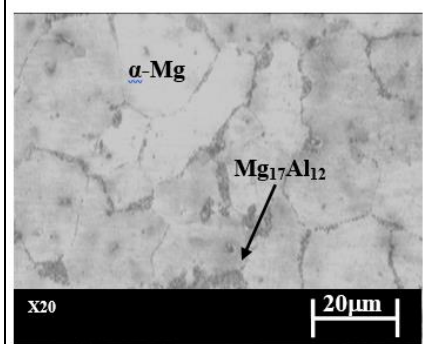
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

Alaşım	Homojenizasyon (48 Saat)	Yaşlandırma (8 Saat)
AZ91		
	Yaşlandırma 16 Saat	Yaşlandırma 32 Saat
		
	AZ91 Homojenizasyon (48 Saat) SEM	
		

Şekil 17: Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının mikroyapı (OM) ve SEM görüntüleri.

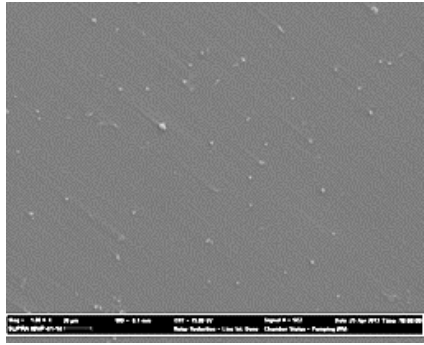
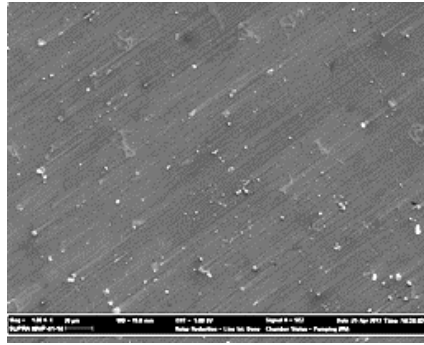
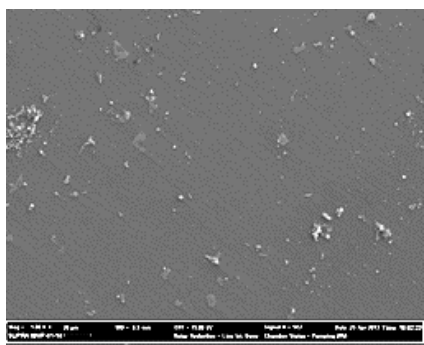
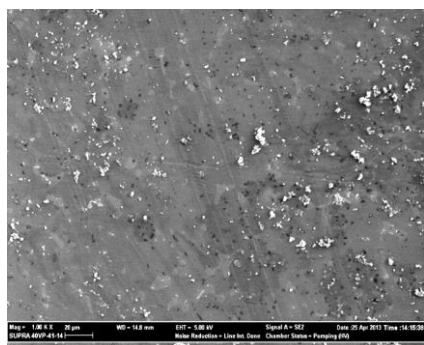
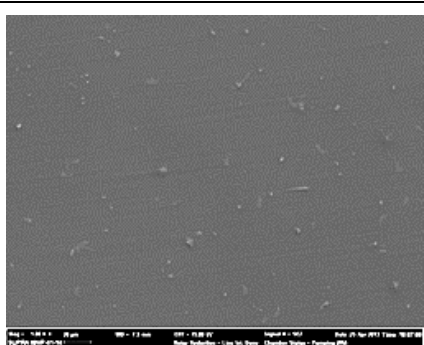
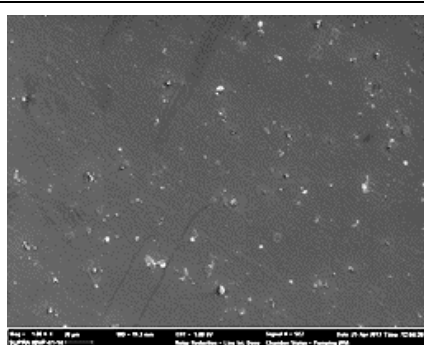
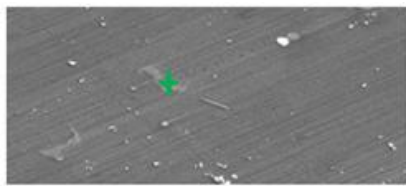
AZ91 alaşımı homojenleştirme işleminden sonra yapının döküm sonrası düzensiz oluşmuş β - ($Mg_{17}Al_{12}$) intermetalik fazın matris içinde çözüldüğü ve yapının homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tane sınırları da belirgin hale gelmiştir.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

İşlem	AZ91+%0,2 Bi	AZ91+%0,5 Bi	AZ91+%1 Bi
Homojenizasyon (48 Saat)			
Yaşlandırma (8 Saat)			
Yaşlandırma 16 Saat			
Yaşlandırma 32 Saat			

Şekil 18: Isıl işlem uygulanmış AZ91 + (%0,2-0,5-1) Bi alaşımının mikroyapı (OM) görüntüleri.

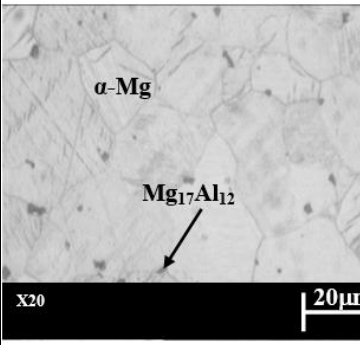
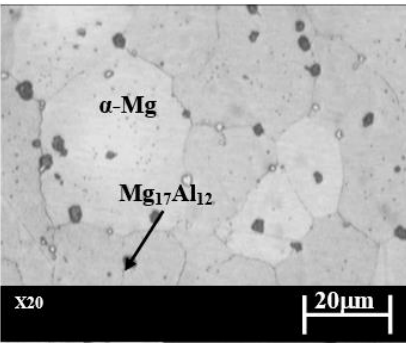
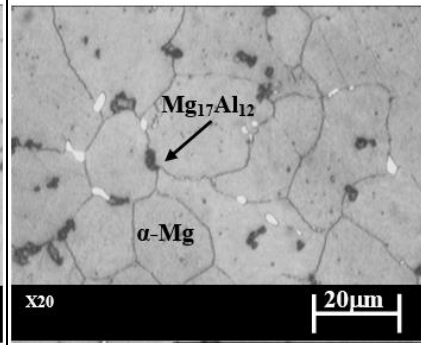
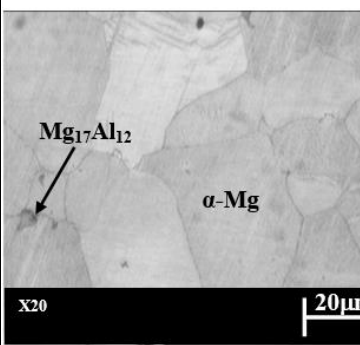
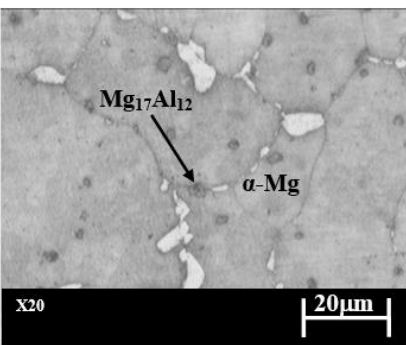
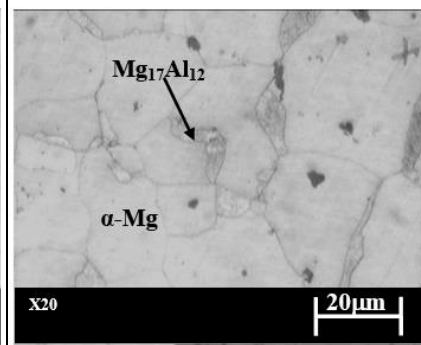
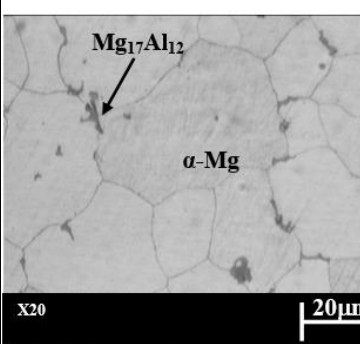
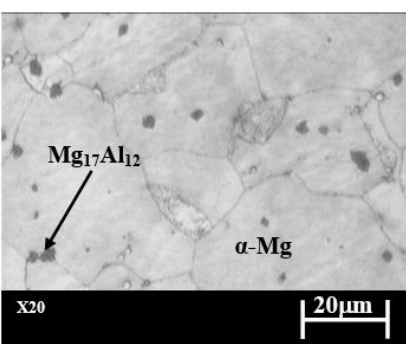
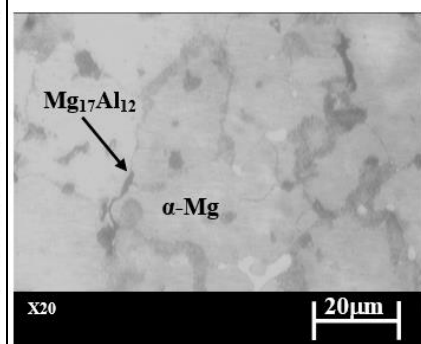
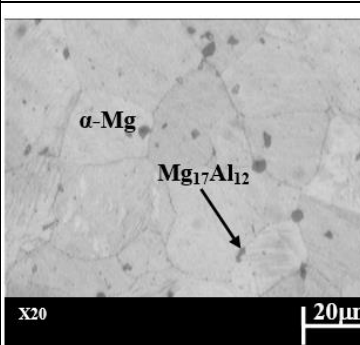
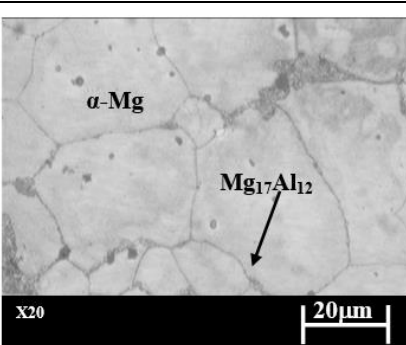
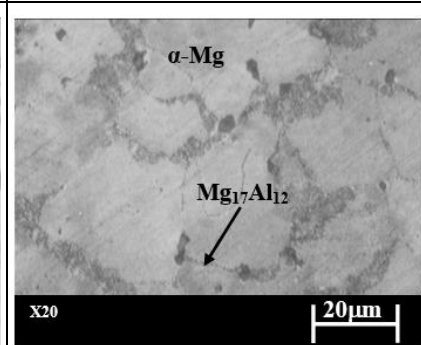
AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

İşlem	AZ91+0,2 Bi	AZ91+%1 Bi												
Homojenizasyon (48 Saat)														
Yaşlandırma 16 Saat														
Yaşlandırma 32 Saat														
EDS		 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Ağırlık%</th> <th>Atomik%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mg K</td> <td>87.88</td> <td>98.42</td> </tr> <tr> <td>Bi M</td> <td>12.12</td> <td>1.58</td> </tr> <tr> <td>Toplam</td> <td>100.00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Element	Ağırlık%	Atomik%	Mg K	87.88	98.42	Bi M	12.12	1.58	Toplam	100.00	
Element	Ağırlık%	Atomik%												
Mg K	87.88	98.42												
Bi M	12.12	1.58												
Toplam	100.00													

Şekil 19: Isıl işlem uygulanmış AZ91+(%0,2 ve 1) Bi alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi.

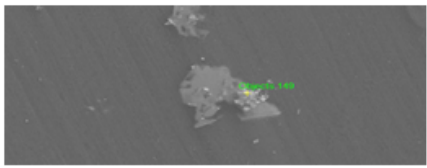
AZ91 + Bi ilaveli alaşımların homojenleştirme ısıl işleminden sonra yapının homojen hale geldiği ve artan Bi miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β -(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazında kabalaştığı görülmüştür. Artan yaşlandırma süresi ile çökelti oluşumunda da kabalaşmalar görülmektedir.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

İşlem	AZ91+%0,2 Sb	AZ91+%0,5 Sb	AZ91+%1 Sb
Homojenizasyon (48 Saat)			
Yaşlandırma (8 Saat)			
Yaşlandırma 16 Saat			
Yaşlandırma 32 Saat			

Şekil 20: Isıl işlem uygulanmış AZ91 + (%0,2-0,5-1) Sb alaşımının mikroyapı (OM) görüntüleri.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

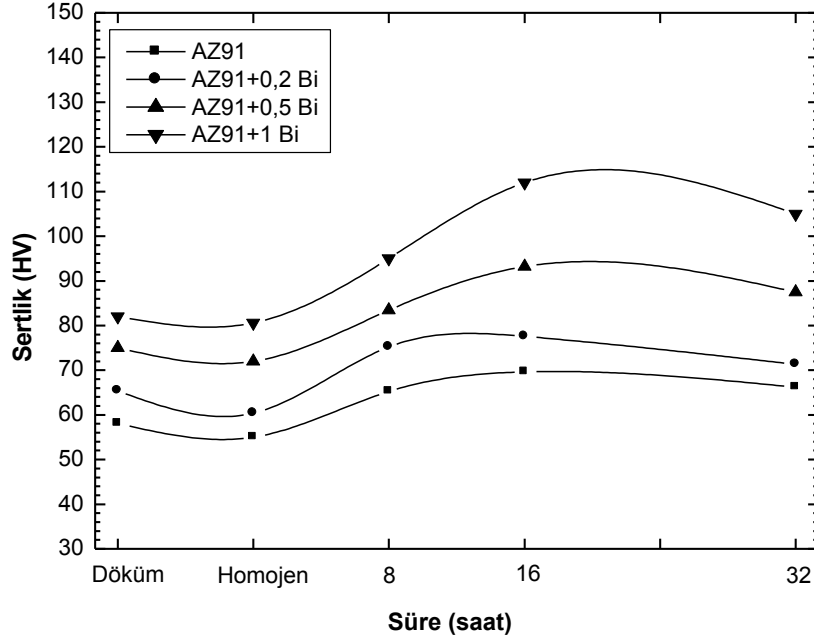
İşlem	AZ91+0,2 Sb	AZ91+%1 Sb															
Homojenizasyon (48 Saat)																	
Yaşlandırma 16 Saat																	
Yaşlandırma 32 Saat																	
EDS		 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Ağırlık%</th> <th>Atomik%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mg K</td> <td>29.15</td> <td>33.04</td> </tr> <tr> <td>Al K</td> <td>64.07</td> <td>65.42</td> </tr> <tr> <td>Sb L</td> <td>6.78</td> <td>1.53</td> </tr> <tr> <td>Toplam</td> <td>100.00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Element	Ağırlık%	Atomik%	Mg K	29.15	33.04	Al K	64.07	65.42	Sb L	6.78	1.53	Toplam	100.00	
Element	Ağırlık%	Atomik%															
Mg K	29.15	33.04															
Al K	64.07	65.42															
Sb L	6.78	1.53															
Toplam	100.00																

Şekil 21: Isıl işlem uygulanmış AZ91+(%0,2 ve 1) Sb alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizi.

AZ91 + Sb ilaveli alaşımların homojenleştirme ısıl işlemi ile yapı homojen hale gelmiş olup tane sınırlarının da belirginleştiği gözlenmiştir. Ayrıca Sb miktarına bağlı olarak tane sınırlarında oluşan β -(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazın ve ısıl işlemi sonucunda ikincil fazın daha da kabalaştığı gözlenmiştir.

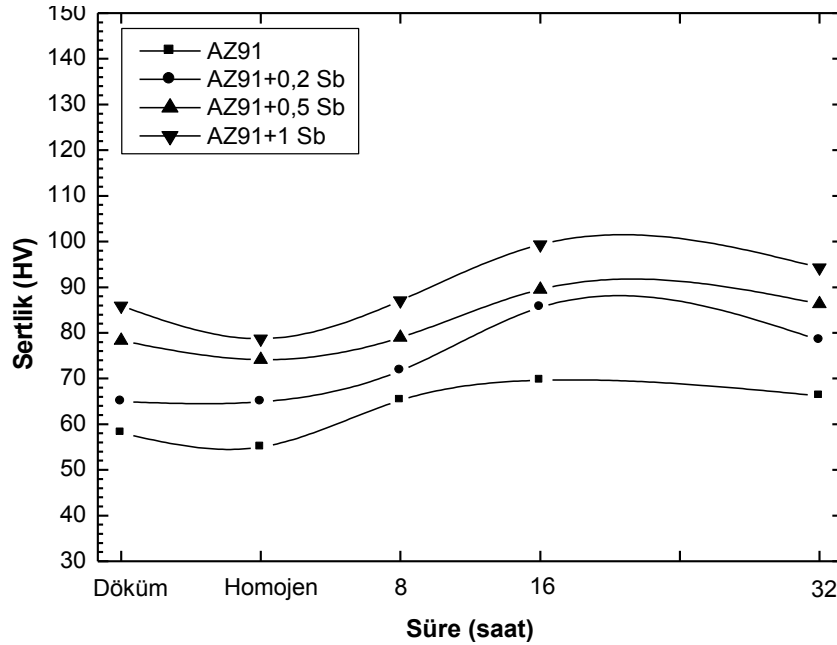
5.2. Sertlik Sonuçları

AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) *Bi* alaşımının sertlik değişimleri Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22: AZ91+Bi alaşımı sertlik değerleri

AZ91 alaşımına ilave edilen *Bi* elementinin sertlik değerleri incelendiğinde; homojenleştirme ile sertliğin bir miktar düştüğü ve yaşlandırma süresi arttıkça döküm haline göre sertliğin gözle görülür bir şekilde yükseldiği görülmüştür. En yüksek sertlik değerleri %1 *Bi* ilaveli AZ91 alaşımına 16 saat uygulanan yaşlandırma süresinde görülmüştür. AZ91'e ilave edilen (%0,2-%0,5-%1) *Sb* alaşımının sertlik değişimleri Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23: AZ91+Sb alaşımı sertlik değerleri

6. SONUÇLAR

AZ91 alaşımında α -Mg ana matris ile birlikte, ince bir faz olarak tane sınırlarında β -(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazı ve α - β ötektiğinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Kang ve ark., 2007), (Wang, ve ark., 2001). (Şekil 14(c)) EDS analizleri sonucunda, α -Mg, β ve α - β fazlarının varlığı tespit edilmiştir.

Isıl işlem uygulanmış AZ91 alaşımının mikroyapısı (Şekil 17) incelendiğinde 8 saat yaşlandırma işlemi sonunda taneler düzenli hale gelerek tane sınırlarındaki intermetalik fazların çözündüğü ve eşit dağılım gösterdiği saptanmıştır. Yaşlandırma süresi artarken tane sınırlarındaki intermetalik fazların kabalaştığı gözlenmiştir.

AZ91'e ilave edilen her bir alaşım elementi (Bi ve Sb) tane sınırlarındaki Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının dağılımını göstermiştir. AZ91'e ilave edilen farklı alaşım elementlerine (Bi ve Sb) bağlı olarak sırasıyla Mg₃Bi₂ ve Mg₃Sb₂ intermetalik fazların açığa çıktığı gözlenmektedir. Bu tür ikincil fazlar genellikle tane sınırlarında β -(Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazına bitişik yerlerde özellikle yer almaktadır. Her bir alaşım elementi için yapılan EDS sonuçları bu alaşım elementlerinin oluşturduğu intermetalik fazların varlığını ortaya çıkarmıştır. Genelde Mg'un bu tür alaşım elementleriyle oluşturabildiği bileşiklerin daha sert bir fazın oluşumunu sağladığı literatürde de kendini göstermektedir.

AZ91'e ilave edilen alaşım elementlerinin (Bi ve Sb) oluşturduğu intermetalikler homojenleştirme ısıl işlemi neticesinde matris içerisinde homojen bir çözünme kaydedilmiştir. Mikroyapılar incelendiğinde homjenleştirme ısıl işlemi sonunda tane sınırlarında yine de bir miktar çözünmemiş intermetalik fazlara rastlanmaktadır. Homojenleştirme ısıl işleminden sonra yapılan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda ise ikincil fazların artan yaşlandırma süresine bağlı olarak mikroyapıda belirginliği ortaya çıkmaktadır. 32 saat yaşlandırma süresi sonunda intermetalik fazların daha fazla kabalaştığı tespit edilmiştir.

7. KAYNAKÇA

- Aizawa, T., & Song, R. (2006). Mechanically induced reaction for solid-state synthesis of Mg₂Si and Mg₂Sn. *Intermetallics*, 14(4), 382–391.
- Askeland, D. (1998). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Atalay, O. (2006). Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baker, H. (1998). Alloy Phase Diagrams. *ASM Handbook*, 3, 280-285 .
- Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U., & Pai, B. (2007). Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science & Engineering*, 457, 275-281.
- Barber, L. (2004). Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys, M.Sc. Thesis. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.
- Beffort, O., & Hausmann, C. (1999). Das leichtmetall magnesium und seine egierungen. *EMPA Mg seminar*. Thun 15-22.
- Blawert, C., Hort, N., & Kainer, K. (2004). AUTOMOTIVE APPLICATIONS OF MAGNESIUM AND ITS ALLOYS. *TRANS. INDIAN INST. MET.*, 57(4), 12.
- Bolstad, J. (2000). Magnesium alloy development for intelligent magnesium Designs. *SinoMaG seminar*, (s. 8-14). Beijing-China.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

- Candan, Ş., Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., & Candan, E. (2011). Effects of titanium addition on mechanical and corrosion behaviours of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5), 1958–1963.
- Carbonneau, Y., Couture, A., Van Neste, A., & Tremblay, R. (1998). On the observation of a new ternary MgSiCa phase in Mg-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(6), 1759–1763.
- Corp., M. M. (2006). *Magnesium parts for automotive applications*. Italy: Meridian products report.
- Davis, J. (1998). Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM Handbook.
- Dobrzanski, L., Tanski, T., Cizek, L., & Brytan, Z. (2007). Structure and properties of magnesium cast alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 567-574.
- Elen, L. (2012). Effects Of Bi And Sb Additions With Solidification Rate On The Microstructure And Mechanical Properties Of The Az91 Alloys, M.Sc. Thesis. Karabuk: Karabuk university Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Elen, L., Çicek, B., Koç, E., Türen, Y., Sun, Y., & Ahlatcı, H. (2019). Effects of alloying element and cooling rate on properties of AM60 Mg alloy. *Mater. Res. Express*, 6(9).
- Elen, L., Türen, Y., & Koç, E. (2019). Effects of Solidification Rate on Microstructure and Mechanical Properties with Sb at Different Ratio of AZ91 Quality Mg Alloy. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 451-463.
- Eliezer, D., Aghion, E., & Froes, F. (1998). Magnesium science, technology and applications. *Advanced Performance Materials*, 201-212.
- Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., & Wu, S. (1996). Potential automotive uses of wrought magnesium alloy., (s. 1-7).
- Guthrie, S., Thomas, G., Bauer, W., & Yang, N. (1996). The development of lightweight hydride alloys based on magnesium, Master, Ms.C. Thesis. California: Sandia National Laboratories Department of Energy.
- Hillis, J. (2002). The international program to identify alternatives to SF6 for magnesium melt protection. *The International Magnesium Association* (s. 1-8). San Diego, U.S.A.: Noranda Magnesium Inc.
- Jambor, A., & Beyer, M. (1997). New cars-new materials. *Materials&Design*, 4(6), 203-209.
- Johansson, S. (2002). Magnesium Alloys, Summary of chapter 1-7 in light alloys by I.J.Polmear. *Engineering Materials*, 5, 17-20.
- Kaçar, İ., & Öztürk, F. (2006). Magnezyum Alaşımlarının Şekillendirilmesindeki son Gelişmeler. *Tasarım İmalat Analiz Kongresi*. Balıkesir.
- Kang, D., Park, S., Oh, S., & Kim, N. (2007). Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys. *Materials Science & Engineering*, 449(451), 318–321.
- Kazdal, H. (1999). Magnezyum alaşımları: Otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği. 3-39.
- Lee, S., Lee, S., & Kim, D. (1998). Effect of Y, Sr, and Nd additions on the microstructure and microfracture mechanism of squeeze-cast AZ91-X magnesium alloys. *Metall and Mat Trans A*, 29(4), 1221–1235.
- Li, Q., Zhang, Q., Li, C., & Wang, Y. (2011). Effects of Bi on mechanical properties of magnesium alloy AZ81. *Advanced Materials Research*, 284–286, 1693–1696.
- Mordike, B., & Kainer, K. (1998). Magnesium alloys and their applications. *Werkstoff-Informationsgesellschaft*, 34-47, 125-132, 477-482.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

- Oğuz, B. (1990). *Demir Dışı Metallerin Kaynağı*. Oerlikon Yayını.
- Öz, Ö. (2007). Yaşlandırma Isıl İşleminin AA 7075 Malzemeli Dikdörtgen Plağın Burkulma Yüğü Üzerine Etkisi. Zonguldak: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Park, W., Park, H., Kim, H., & Kim, N. (1994). Structure and decomposition behaviour of rapidly solidified Mg Nd X (X, Al, Si) Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 179–180, 637–640.
- Polmear, I. (1989). Magnesium alloys. *Light Alloys, Metallurgy and Materials Science Series*, 169–210.
- Polmear, I. (1996). Recent Developments in Light Alloys. *Materials Transactions, JIM*, 37(1), 12–31.
- Qudong, W., Yizhen, L., Xiaqin, Z., Wenjiang, D., Yanping, Z., Qinghua, L., & Jie, L. (1999). Study on the fluidity of AZ91+xRE magnesium alloy. *Materials Science and Engineering*, 271, 109–115.
- Savaşkan, T. (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Trabzon: Derya Kitabevi.
- Schwam, D., Wallace, J., Zhu, Y., Viswanathan, S., & Iskander, S. (2000). *Enhancements in magnesium die casting impact properties*. Ohio: Case Western Reserve University.
- Südholz, A., Birbilis, N., Bettles, C., & Gibson, M. (2009). Corrosion behavior of Mg alloy AZ91E with atypical alloying additions. *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1–2), 109–115.
- Şendeniz, M. (2006). Seçilen Bir Al-Mg-Si Alaşımının (AlMgSi0.5;Etial 60) Isıl İşlemlerle Özellik Değişimlerinin İncelenmesi. Bursa: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turen, Y. (2013). Effect of Sn addition on microstructure, mechanical and casting properties of AZ91 alloy. *Materials & Design*, 49, 1009–1015.
- Ünal, M. (2014). Effects of solidification rate and Sb additions on microstructure and mechanical properties of as cast AM60 magnesium alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(2), 80–86.
- Vogel, M. (2002). Mikrostruktur und kriechverhalten von magnesium-druckgusslegierungen im system Mg-Zn-Al-Ca, Ph.D. Thesis. Stuttgart: Max-Planck-Institut für Metallforschung 6–20.
- Wang, Q., Chen, W., Zeng, X., Lu, Y., Ding, W., Zhu, Y., & Xu, X. (2001). Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Journal Of Materials Science*, 36, 3035–3040.
- Wang, Y., Liu, G., & Fan, Z. (2006). Microstructural evolution of rheo-diecast AZ91D magnesium alloy during heat treatment. *Acta Materialia*, 54(3), 689–699.
- Watari, H. (2006). Trend of research and development for magnesium alloys. *Science and Technology Trends*(18), 84–97.
- Yuan, G., Sun, Y., & Ding, W. (2001). Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering*, 22, 38–44.
- Žaludová, N. (2005). Mg-RE Alloys and their applications. *WDS'05 Proceedings of Contributed Papers*, 3, 643–648.
- Zhang, J., Guo, Z., Pan, F., Li, Z., & Xiaodong, L. (2006). Effect of composition on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Al alloys. *Materials Science and Engineering*, 456, 43–51.
- Zhang, Z. (2000). Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications, Doctoral Thesis (PhD). Quebec: Faculte Des Sciences Et De Genie Universite, 2–75.

AZ91 ALAŞIMINA ELEMENT İLAVESİ VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN MİKROYAPI VE SERTLİĞE ETKİSİ

Zhang, Z., Couture, A., & Luo, A. (1998). An Investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys. *Scripta Materialia*, 39, 45-53.

Zhou, W., Aung, N., & Sun, Y. (2009). Effect of antimony, bismuth and calcium addition on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91 magnesium alloy. *Corrosion Science*, 51(2), 403-408.

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Şengül Danışman *, Tuba Demirel

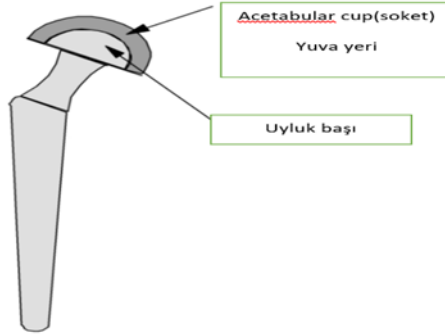
* Erciyes Üniversitesi, MELİKGAZİ, KAYSERİ

sdanisman@erciyes.edu.tr

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Sağlık sektöründe biyomedikal alanda kalça ve diz eklemleri, koroner stentler, kalp kapakçıkları, göz içi lensleri gibi çok çeşitli protez ve implant malzemeleri kullanılmaktadır. Bunların başında eklemlerdeki problemler sebebiyle kullanılan kalça ve diz implantları gelmektedir. Şekil 1'de gösterilen kalça protezi, acetabular cup(soket) genellikle ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilenden (UHMWPE) yapılır ve femur başı ise metalik alaşımlardan (CoCr, paslanmaz çelik veya Ti6Al4V) veya seramikten (Al₂O₃ veya ZrO₂) yapılır. Ortopedik eklemlerin karmaşık hareketleri, aynı zamanda çalışma ortamındaki etkiler nedeniyle bu tip implantların aşınması söz konusu olmaktadır. İmplantlarda aşınma, yorulma davranışı ve buna bezer olumsuz etki eden mekanik özellikleri azaltmak için yeni bir kaplama çeşidi olan DLC kaplamalar gelecekte implantlar için umut ışığı olmuşlardır [1].



Şekil 1. Kalça implantının şeması [1]

Vücuda yerleştirilmiş bir implant bir süre sonra gevşemeye, ani yük altında kırılmaya ve vücuda temas eden bölgelerde iltihaplanmalara sebep olabilir. Koşma, yürüme gibi farklı hareket durumları ile bu hareketlerin yapıldığı zeminin düz ve eğimli olması durumları ve yürüyüş hızının artmasıyla implantın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu gibi problemlerin ortadan kalkması için DLC kaplama işlemi uygulandığında malzemenin mekanik özelliklerini de iyileştirdiği görülmüştür [2].

DLC kaplamalar, düşük sürtünme katsayısı, biyoyumluluk, iyi korozyon direnci ve aşınma önleyici gibi mükemmel özellikleri nedeniyle biyomedikal malzemelerin yüzey modifikasyonunda umut verici olmuşlardır. Özellikle de ortopedik implantların klinik olarak güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için korozyon direnci gibi yüzey özelliklerini de geliştirmek önemlidir [3].

DLC kaplamaların bütün biyoyumluluk testleri başarılı sonuçlanmıştır. DLC, mikroyapısında hem sp² (grafit benzeri) bağlar ve sp³ (elmas benzeri) bağları içeren, amorf bir karbon biçimi olarak karşımıza çıkmıştır. Kaplama işlemine ve parametrelerine bağlı olarak sp²/ sp³ oranı kontrol edilebilmekte, dolayısı ile kaplamanın sertlik, sürtünme katsayısı gibi mekanik özelliklerine müdahale edilebilmektedir [4].

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Elmas benzeri karbon (DLC), amorf karbonun içinde önemli C-C sp³bağına sahip bir metal-kararlı yapıdır. Son yıllarda çeşitli biriktirme yöntemlerinin gelişmesiyle, DLC kaplamalar endüstriyel, askeri, tıbbi ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar çeşitli taban malzemelerin performansını arttırmak için kullanılmaktadır. DLC kaplamaların çizilme direncine, kaplamanın kalınlığına, alt tabakanın özelliklerine, birikme vb. koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [5].

Biyomedikal malzemelerde artan yük, çalışma sıcaklıkları, kuru koşullar gibi oluşan nedenler malzemenin çalışma parametrelerinin artışına neden olmuşlardır. DLC kaplamalar bu gibi sorunların önüne geçerek çok kaplanan taban malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir [6].

DLC ile yapılacak kaplamalara farklı metalik elementlerin katılmasıyla (Cr, Ti, Nb, Mo, karbür oluşturmeyen biçimdeki elemanlar – Ag, Cu, Al, Ni vb.) kaplamalardaki artık gerilmeleri azaltır, mekanik özelliklerini iyileştirir, biyo uyumluluğu artırır, malzemenin sertliğini artırır, bakteriyel tutulumunu azaltır ve DLC filmlerin yeni işlevlerini etkinleştirir [7].

Ti – 6Al – 4V (Ti64) alaşımı, düşük yoğunluğu, yüksek korozyon direnci, iyi biyo-uyumluluk, yüksek mekanik mukavemet ve nispeten düşük elastik modülü nedeniyle havacılık, otomotiv, kimya mühendisliği ve biyomedikal uygulama için önemli bir malzemedir. Ti64 alaşımının taban malzeme olarak kullanılarak yapılan DLC kaplama işlemiyle malzemenin mekanik davranışını geliştirmek için umut verici olmuştur [8].

Yük destekli implantın ana problemi uzun süre kullanımı boyunca malzemede yorulma meydana gelmektedir. İyi fiziksel özellikleri (yüksek sertlik, çizilme direnci), kimyasal özellikleri (korozyon direnci, bağıl inertlik) ve kan uyumluluğuna, biyolojik tepkilere, toksisiteye ve hücre yapışmasına bağlı olarak türevsel biyolojik özellikler, biyomedikal alanda DLC'nin potansiyel yararlarını kanıtlamıştır [9].

İmplantların ömrü, kullanılan malzemelerin tasarımına ve kalitesine güçlü bir şekilde bağlıdır. Örneğin, Kalça eklem kırığı en kritik halk sağlığı sorunlarından biri haline gelmiştir. CoCrMo alaşım kalça eklemi değişimi için kullanılan en yaygın malzemelerden biridir. Bu malzeme korozyon ve aşınmaya, biyolojik olarak uyumlu ve yüksek mukavemete karşı yüksek dirençlidir. Buna rağmen, implantlar zamanla gevşeyip malzemenin hareketli yüzeyler arasındaki sürtünmeden dolayı toksik iyonlar açığa çıkarmıştır. Bu da implantların 20 yıl içinde başarısız olmasını ve yenilenmesini gerektirmiştir. DLC Kaplamalar, implantların hacim özelliklerini değiştirmeden yüzey özelliklerini geliştirebilir ve böylece sürtünmeden dolayı çıkan iyon salınımını azaltıp implantların hem performansını hem de ömrünü iyileştirmek için çok ümit vericidirler. DLC'nin kullanımını sınırlayan önemli konulardan biri, taban malzeme üzerine zayıf yapışmasıdır. Düşük yapışma, birikim sırasında iyon bombardımanı ve taban malzemeyle kaplama arasındaki zayıf etkileşim nedeniyle DLC'nin yüksek iç gerilmesine bağlanabilir. İç gerilmeler sonucunda DLC filminin ince tabakalara ayrılmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, titanyum katkısının DLC'nin malzeme üzerindeki yapışmasını artırdığını ve azot (N) katkısı ise DLC kaplamanın iç gerilmesini azaltılabileceği sonucuna varılmıştır [10].

DLC kaplamalar, metalik taban malzeme üzerine biriktirildiklerinde yapışma problemlerine karbonun çelik içine yayılmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda kaplama büyümesi gecikmektedir. Kaplama ve taban malzemenin termal genleşme katsayıları uyumlu değildir ve zayıf yapışma ve yüksek iç gerilmeler üretmektedir. Bu problemleri çözmek için bazı yüzey iyileştirme işlemleri geliştirilmiştir. Plazma veya iyon nitrüleme, yüzey sertliğinin azot difüzyonu vasıtasıyla iyileştirilmesine izin veren bir yüzey modifikasyon işlemidir. Plazma nitrüleme işlemleri DLC kaplama biriktirme için iyi bir ön arıtma seçeneği olabilir. Plazma nitrüleme, yorulma gücünü artırır ve aşınma direncini artırır [11].

Diğer bir yöntem ise DLC filmin yapışmasını arttırmak için Si, SiC, Ti, TiC, TiN gibi ve bazen taban malzemesi üzerine ilave ara tabakaların biriktirilmesi önemlidir [12].

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

1960'lardan beridir son yirmi yıl boyunca biyomedikal implantların ömrünü arttırılması, daha iyi biyoaktivite, kemik-implant etkileşimdeki mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, aşınmanın azaltılması önemli araştırma konusu olmuştur. Biyolojik etkinliği, metalik ve seramik implantlardaki kimyasal ve yüzeysel değişikliklerle artırılarak yüzeylerin iyileştirilmesi, biyomedikal alanda çok sayıda araştırmacının ana odak noktası olmuştur [13].

2. PVD(FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) KAPLAMA TEKNİĞİ

2.1. Giriş

Çoğu metalik ve bazı seramik malzemeler eritme/ katılaşma teknolojisi vasıtasıyla üretilir. Normal katılaşma denge şartlarında gerçekleştiği için malzeme özelliklerinde fazla bir değişim olmaz. Halbuki buhar fazından üretilen katı malzeme özellikleri "denge dışı " özellikleriyle de meydana getirilebildiğinden, sıvı fazdan üretilen aynı malzeme özelliklerinden çok daha geniş bir sahada değiştirilebilmektedir. Bu sayede buhar fazından katı malzemelerin üretimi gibi yığıma tekniklerinin ortaya çıkmasıyla üretilen malzeme çeşitliliği büyük oranda artmıştır.. Ayrıca buhar fazından yığıma teknikleri kullanılarak mikro yapıda da çok büyük değişimler mümkün olabilmektedir. Eritip katılaştırılarak üretilen bir bakır- nikel alaşımı daima tek fazlı katı çözüldüden ibaret olduğu halde, bu teknikler yardımı ile üretilen aynı alaşım , yığıma sıcaklığına bağlı olarak nikel ve bakırın değişik tabakalarını ihtiva edebilir. Bu yüzden yüzey kaplama teknolojileri hızla gelişerek endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahip olmuşlardır.

2.2. PVD Kaplama Tekniği

İnce film elde etmede fiziksel buhar biriktirme (Physical vapor deposition) metodu kullanılmaktadır. Fiziksel buhar kaplama (PVD) metodunda, vakumlu ortamda buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan malzemenin üstünde ince bir film katmanı olarak biriktirilir. Genelde 1-5 mikron arasında taban kalınlıkları elde edilir. Elde edilen ince tabakalar 200 ile 500°C arasında gerçekleştirilir. PVD metodunun alt dalı olan Rf Magnetron Sıçratma yöntemi, yüksek vakum altında katı hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, atomların yüzeyden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların altlık malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Günümüzde sıçratma yöntemi yaygın olarak yüzey temizlemede, yüzey aşındırmada, ince film biriktirmede kullanılmaktadır [14].

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplama tekniği vakum ortamında gerçekleştirilmekte olup, buharlaştırma ve sıçratma olmak üzere temel iki metoda sahiptir. Bu metotlarda kullanılan kaynaklara bağlı olarak alt sınıflara ayrılmaktadır. Günümüzde bu metotlar içerisinde en çok kullanılanları yüksek birikim oranlarına sahip olan katodik ark buharlaştırma, iyon demeti yardımı ile büyüme ve manyetik kaynaklı sıçratma gibi metotlardır. Bu metotlar vakum ortamında elde edilen plazma (iyonize edilen gaz ortamı) içerisinde gerçekleştirilmektedir. Çalışma ortamında farklı gazlar kullanılarak farklı kaplama türleri oluşturulabilmektedir [15].

Çok sayıda DLC kaplama tekniği mevcuttur. Bu tekniklerden "Physical Vapor Deposition" (PVD) DLC kaplama işlemi, PVD metal buharının farklı gazlar ile reaksiyona girerek ince bir film tabakası oluşturması işlemidir. PVD ile DLC kaplama işlemi için gerekli ısı idealde 250-400°C'dir ancak işlem 70-450°C arasında da uygulanabilir. Oluşturulan filmin kalınlığı 2-5 mikron olduğu gözlemlenmiştir [16].

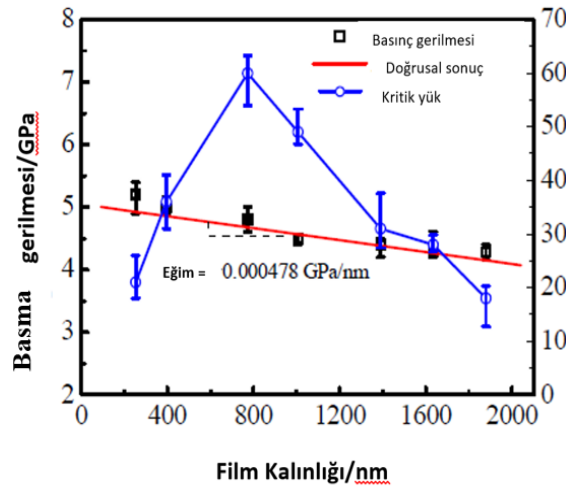
3. DLC FİLMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Geleneksel olarak, mekanik anlamda iyi tribolojik özelliklere, mekanik özelliklere ve yüksek sertliğe(>10GPa≈1000HV) sahip yapılara sert kaplama denir. En yaygın kullanılan sertkaplamalar, oksitler, karbürler, nitrürler, boritler, sermetler ve elmadır. Sert kaplamalar, uygulama şartlarına bağlı

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

olarak, katı yüzeylerde dayanımı artırmanın yanısıra, tribolojik, korozyon, elektriksel, ısıl vd. veestetik özellikler bakımından da faydalar sağlamaktadır. DLC kaplamalar da sert kaplama sınıfına girmektedir.

NiTi (% 50.7 Ni,) alaşımı taban malzemesi üzerine Ark ile geliştirilmiş magnetron sıçratma tekniği (Arc enhanced magnetron sputtering) kullanılarak 253-1880 nm arası kalınlığa sahip elmas benzeri karbon (DLC) filmi biriktirilmiştir. DLC kaplı NiTi alaşımının mekanik özelliklerini belirlemek için kazıma testleri yapılmış ve farklı kaplama kalınlıklarının yüzeye uygulanan yük etkisiyle yüzeyin değişimi incelenmiştir. Şekil 2'de film kalınlığının bir fonksiyonu olarak DLC kaplamaların basma yükü ve kritik yükündeki değişimi verilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi DLC kaplamadaki artık basma gerilmesi 4.5 GPa civarında gözlemlenmiştir ve film kalınlığı arttıkça 0.000478 GPa / nm olan grafikteki eğim oranı da yavaşça azalmıştır. Kaplamaların kritik yükü (Lc) önce arttığı daha sonra da kaplama kalınlığı arttıkça azaldığı görülmüştür. Kaplamanın kalınlığı yaklaşık 800 nm olduğunda kritik yükü (Lc) yaklaşık 60 N'ye ulaşmıştır. Film kalınlığı arttıkça kritik gerilme azalmıştır. Film kalınlığı arttıkça kritik gerilmeye ulaşmak için daha küçük bir basma gerilmesi yani normal yüke ihtiyaç duyulmaktadır. 700 ile 1000 nm arasındaki kalınlığa sahip DLC kaplamaların orta düzeyde artık gerilme, yüksek kritik yük, uzun aşınma ömrü ve iyi korozyon direncine sahip olduğu bulunmuştur. Bu nedenle 700 ile 1000 nm arası kalınlığa sahip DLC kaplamalar, yapılan deney sonucunda biyomedikal NiTi alaşımının mekanik özelliklerini ve korozyon direncini geliştirmek için uygun olduğu görülmüştür [3].

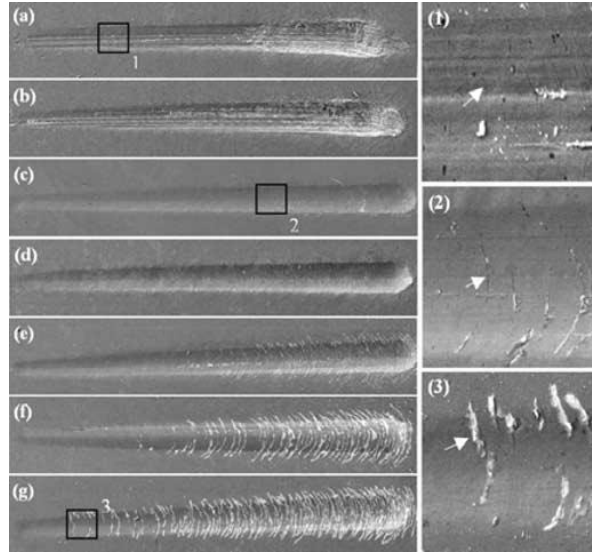


Şekil 2. Film kalınlığının bir fonksiyonu olarak artık gerilmenin ve DLC kaplamaların kritik yükünün değiştirilmesi [3]

Kazıma testi, kaplama ve alt tabaka arasındaki yapışmayı değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem özellikle yumuşak alt tabakalar üzerindeki sert kaplamalar için geçerlidir. DLC ile kaplanmış Yumuşak NiTi taban malzemesi üzerinde kazıma testi uygulandığında, batıcı ucun önündeki malzemelerin plastik yığılmasına yol açarak kaplamada eğilme ve basma gerilmelerine neden olan normal kuvvetin etkisi altında kalmıştır. Kazıma yönteminde, malzeme yüzeyindeki kenarına veya kenarına uzanan yarı dairesel çatlaklar her zaman gözlenmiştir. Şekil 3'te farklı film kalınlığına sahip numuneler üzerinde kazıma izlerinin büyütülmüş görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 3'a göre, ilk arıza şekli yarı dairesel olarak ortaya çıkmıştır. Çatlama, çizilme sırasında batıcı uç yüzeye değmeden önce bir eğilme hatası olduğunu göstermektedir. Film kalınlığı arttıkça kritik eğilme gerilmesini artar ve kritik eğilme gerilmesine ulaşmak için daha büyük bir normal yük gereklidir. Sonuç olarak kritik yük artmıştır. Şekil 3'de büyütülmüş görüntüde gösterildiği gibi, soyulma küçük bir normal yükte meydana gelir ve kazıma sırasında batıcı ucun olduğu yerde yapışmış malzeme gözlemlenmiştir. Film kalınlığı arttıkça, kritik basma gerilmesi azalmıştır ve kritik basma gerilime ulaşmak için daha küçük bir normal yük gerekli olduğu görülmüştür.

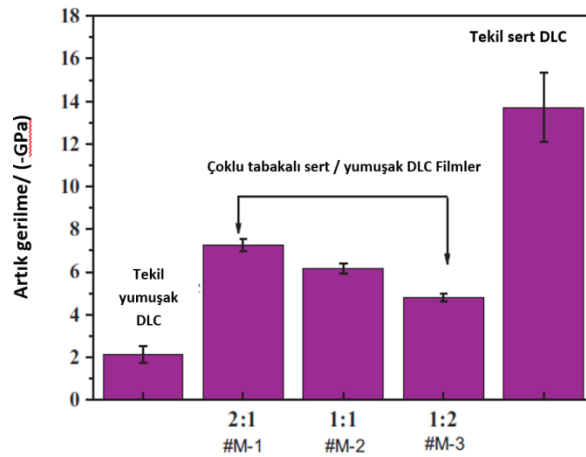
BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Bu nedenle kritik yük azalmalıdır. Şekil 3a ve Şekil 3b, eğilme hasarı gözlenirken, Şekil 3e, Şekil 3f ve Şekil 3g'de ise filmin yapışkan kopukluğunu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, film kalınlığı arttıkça soyulma yoğunlaşmaktadır ve genişlemektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça eğilme çatlamasından yapışma hasarına doğru değişim batıcı ucun olduğu yerde görülmüştür. Genellikle kaplamanın bozulması, eğilme ve basma gerilmelerinin birleşiminden kaynaklanmıştır [3].



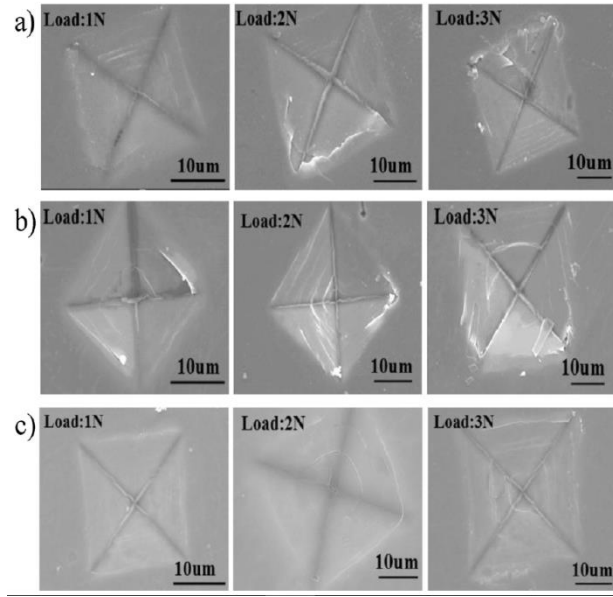
Şekil 3. Farklı kalınlıktaki DLC kaplamalarda kazıma izleri: (a) 253 nm, (b) 426 nm, (c) 754 nm, (d) 1006 nm, (e) 1392 nm, (f) 1635 nm ve (g) 1880 nm. (1), (2) ve (3), sırasıyla (a), (c) ve (g) 'de dikdörtgen alanın bölgesel büyütülmüştür [3]

2:1, 1:1 ile 1:2 arasında değişen sert DLC kalınlığının yumuşak DLC'ye kalınlığı oranına sahip farklı sp^3 yoğunluklu sert DLC tabakalar ve sp^2 yoğunluklu yumuşak DLC tabakalar içeren çoklu tabakalı DLC filmler Ti6Al4V (Ti64) alaşımına taban malzemesi üzerine filtrelenmiş katodik vakum ark tekniği ile biriktirilmiştir. Çok katmanlı DLC filmlerin sp^3 içeriğinin ve sertliğinin, azalan sert DLC kalınlığının yumuşak DLC kalınlığı oranlarıyla sert olan DLC tabakasının kalınlığı azaldığını göstermiştir. Çok katmanlı DLC filmlerin gerilmeleri etkin bir biçimde azaltılabilir ve sert DLC kalınlığının yumuşak DLC'ye kalınlığı oranı azalmasıyla gerilim azalmıştır. Değişim oranı 1: 1 olan çok tabakalı DLC film, sertlik ve artık gerilme arasındaki dengeye bağlı olarak en iyi aşınma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sert DLC filmlerin yüksek artık gerilme sergilerler ve bu yüksek artık gerilme, filmlerin ince tabakalara ayrılmasına neden olabilir. Ti64 alaşımı üzerindeki tek parçalı özelliğe sahip sert DLC filmin kalınlığı 140 nm'nin üzerinde olduğunda, yüksek artık gerilme filmin yapışma direncini azaltacak ve filmin ince tabakalara ayrılıp film çatlaklarına neden olacaktır. Bu nedenle, filmin ince tabakalara ayrılmasının önlemek için DLC filmlerin artık gerilmesi kontrol edilmelidir. Şekil 4'te farklı değişim oranlarına sahip tekil ve çok katmanlı DLC filmleri artık gerilmesi gösterilmektedir. Çok katmanlı DLC filmlerin artık gerilmeleri, küçülensert DLC kalınlığının yumuşak DLC kalınlığı oranlarıyla azaldığı görülmüştür. Farklı sert DLC tabakasının kalınlığı oranlarına sahip çok tabakalı DLC filmler, tekil sert DLC filmlerin artık gerilmelerini etkili şekilde azaltabilmiştir. Çok tabakalı DLC filmleri, tekil olan sert DLC katmanlarından daha düşük basma gerilimine sahiptir. Sert DLC kalınlığının yumuşak DLC'ye kalınlığı oranı arttıkça young modülü ve sertliği de arttırdığı gözlemlenmiştir [8].



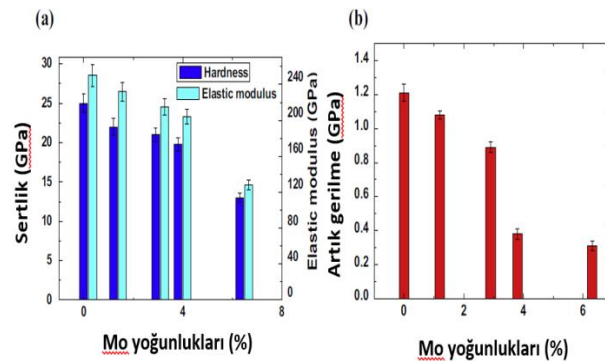
Şekil 4. Monolitik DLC filmleri ve çok katmanlı DLC filmleri için artık gerilmenin farklı değişim (modülasyon) oranları (a) # M-1 (modülasyon oranı 2: 1'dir), (b) # M-2 (modülasyon oranı 1: 1'dir), (c) # M-3 (modülasyon oranı 1: 2'dir) [8]

Çok katmanlı DLC filmlerin nano sertliği 13.5 GPa ile 24.4 GPa aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Modülasyon oranları azalırken, sertlik ve elastik modül artar. 2: 1 modülasyon oranına sahip çok katmanlı DLC film (numune # M-1) en yüksek sertliği (24.4 GPa) gösterir. Bazı araştırma verileri, sp^3 e bağlı içeriğin azalmasının daha düşük bir sertliğe neden olabileceğini göstermiştir. Azalmış modülasyon oranındaki (sert DLC tabakasının kalınlığı) azalma, çok katmanlı DLC filmlerinde sertliğin azaltılmasının ana nedeni olabilir. Şekil 5'te çok tabakalı DLC film yüzeyi üzerindeki iz şeklindeki çatlakların SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi Ti64 alaşımında kaplanmış çok tabakalı DLC filmlerin yapışma özelliğini değerlendirmek için, bir Vickers elmas batıcı uç, 1 N, 2 N ve 3 N yükleri altında çok katmanlı DLC filmlerine batırılmıştır. Çok katmanlı DLC filmlerin yapışma mukavemeti, Vickers iz testindeki çatlakların yayılımının fotoğrafları gözlenerek değerlendirilebilir. Çok katmanlı DLC filmlere 1 N yük yüklendiğinde, filmlerin ilgili taban malzemelerinde tabakalara ayrılmadıklarını ve kopmadıkları görülmüştür. Çok tabakalı DLC filmleri ve taban malzemesi arasındaki yapışmayı daha iyi anlamak için, kaplanmış taban malzemelere 2 N ve 3 N yük uygulanmıştır. 2 N ve 3 N yük altındaki Şekil 5a ve 5b'de # M-1 ve # M-2 numunelerine bakılınca hafif çatlaklar olduğu ve bölgesel filmlerin tabakalara ayrılması gözlemlenmiştir. 2: 1 (numune # M-1) ve 1: 1 (numune # M-2) modülasyon oranlarına (sert DLC tabakasının kalınlığı) sahip çok katmanlı DLC filmler, daha yüksek artık gerilme ve sp^3 bağlı karbon içeriği nedeniyle kötü yapışma özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Bu da filmlerin kırılmasını ve kolay çatlamasını sağlamıştır. Tersine Şekil 5c' de görüldüğü gibi 1:2 modülasyon oranına sahip çok katmanlı DLC filmi (örnek # M-3), Ti64 alaşım taban malzemesinden ayrılmamıştır. 1 N yükünde, çok tabakalı DLC filmleri, numune yüzeyinde batıcı ucun şekli çıkarak bir dereceye kadar deforme olmuş ve # M-3 numunesinin iz bölgesinde hiçbir çatlak yayılma olayı görülmemiştir. Sonuçlara bakıldığında, 1: 2 modülasyon oranına (sert DLC tabakasının kalınlığı) sahip çok katmanlı DLC filmlerin arasında en iyi yapışma mukavemetine sahip olduğunu görülmüştür [8].



Şekil 5. Farklı modülasyon oranları (a) # M-1 (modülasyon oranı 2: 1), (b) # M-2 (modülasyon oranı 1:1) olan çok katmanlı DLC filmlerin Vickers batıcı ucu SEM görüntüsü, (c) # M-3 (modülasyon oranı 1: 2'dir) [8]

Mo-DLC nanokompozit kaplamalar, yapay kalp kapakçıklarına ve endovasküler stentlere uygulanan yeni bir çeşit malzeme olacaktır. Mekanik ve kan uyumluluğu özelliklerine sahip Mo (molibden) katkılı elmas benzeri karbon (Mo-DLC) kaplamalar, Si ve WC (tungsten karbür)–CO sementit karbür alt taban malzemeleri üzerine kapalı alan dengesiz magnetron sıçratma tekniği ile biriktirilmiştir. Termale neden olan gerilmeleri azaltmak veya DLC kaplamaların çizilme testindeki kritik arıza yükünü arttırmak için DLC kaplamasına Mo katılmıştır. Mo yoğunlukları ile Mo-DLC kaplamalarının sertliğini, elastik modülünü (a) ve artık gerilmeyi (b) Şekil 6'da gösterilmiştir. Mo yoğunluğu arttıkça sertlik ve elastik modülün azaldığı görülmüştür. Mo yoğunluğu arttığında sp^3 bağları veya tetra-hedral bağlar kırılacaktır, bu da DLC kaplamaların sertliğinin, elastik modülünün ve gerilmesinin azalmasına neden olmuştur. Şekil 6'da görüldüğü gibi DLC kaplamaların gerilimi, Mo içeriği % 0'dan % 6.3'e çıktıkça, 1,2 GPa'dan 0.3 GPa'ya düşmektedir. Mo-DLC kaplamalarda Mo yoğunluğu % 3.8 iken kaplamadaki sertlik değeri 20.8 GPa, artık gerilmesi değeri ise 0.38 GPa'dır. Mo katkısı DLC filmde arttıkça sertliğinin DLC kaplamalarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde azalmıştır. Saf DLC kaplamaların kalınlığı yaklaşık 0,9 µm'dir. Bununla birlikte, Mo yoğunluğu % 1.2, % 3.8 ve % 6.3, olan Mo-DLC kaplamalar için, kalınlıkları sırasıyla 1.2, 1.25 ve 1.4 µm değerine çıktığı gözlemlenmiştir [17].



Şekil 6. Çeşitli Mo yoğunluklarında biriken Mo-DLC nano kompozit kaplamaların sertliği, elastik modülü (a) ve artık gerilimi (b) [17]

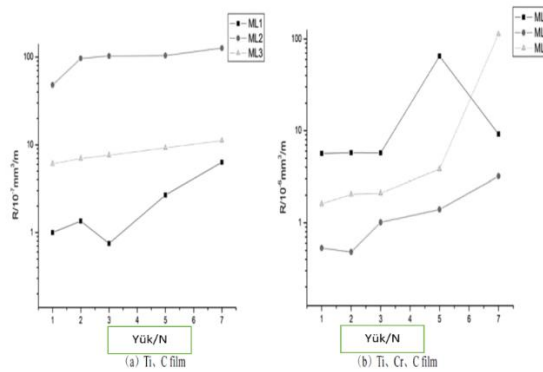
BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Malzemeler aşınma gibi birçok mekanik etkilere maruz kalmaktadır. DLC çok tabakalı kaplamalar (Ti, C ve Ti, Cr, C içeren iki tür elmas benzeri karbon filmi), manyetik kaynaklı sıçratma yöntemi kullanılarak Si wafer taban malzeme üzerinde elde edilmiştir. Ti, C ve Ti, Cr, C içeren iki tür elmas benzeri karbon kaplamaların mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir [18].

Tablo 1. DLC Filmlerin sertlik ve modül değerleri [18]

Material	Hardness H/GPa	Reduced modulus E _r /GPa	H/E _r	
Ti, C	ML1	6.68±0.82	45.8±3.9	0.15
	ML2	5.06±0.22	45.5±1.1	0.11
	ML3	7.67±0.60	55.5±2.5	0.14
	ML4	4.58±0.19	105.8±6.5	0.04
Ti, Cr, C	ML5	15.11±1.93	206.6±15.2	0.07
	ML6	16.58±0.44	223.7±9.3	0.07

Sertliğin modülü oranı, aşınma direnciyle ilişkilidir, oran o kadar yüksekse, aşınma direnci de o kadar iyidir. Ti, C filmleri, Tablo 1'de gösterildiği gibi Ti, Cr, C filmlerinden daha yüksek bir sertlik oranına sahiptir, bu nedenle Ti, C filmleri, aşınma testi sonucuyla tutarlı olan daha iyi aşınma özelliklerine sahip olmalıdır. Cr elementinin sertliği, modülü ve pürüzlülüğü artırdığı, ancak Ti, Cr, C DLC filmlerin aşınma direncini azalttığı bulunmuştur. Ti, C, DLC filmleri daha yüksek H / E değeri nedeniyle mükemmel aşınma direnci göstermiştir, sürtünme katsayısı çeşitli yüklerde 0.1 ~ 0.2 seviyesinde görülmüştür. Kaplamaya Cr katkısı kaplamanın sertliğini, modülünü ve pürüzlülüğünü iyileştirmiştir ancak Ti, Cr, C DLC filmlerin aşınma direncini azaltmıştır. DLC filmlerin farklı yüklerdeki aşınma oranı Şekil 7'de gösterilmiş ve tüm filmlerin aşınma oranının yük artışıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Ti, C filminin aşınma oranı farklı yüklerde, $10^{-7} mm^3 / m$ seviyesinde iken Ti, Cr, C filmlerinin aşınma davranışları farklı yüklerde büyük ölçüde değişir, aşınma oranı yaklaşık $10^{-6} mm^3 / m$ olur. Bu sonuçlar Kaplamaya Cr katkısının aşınma oranını artırdığını ortaya koymaktadır [18].



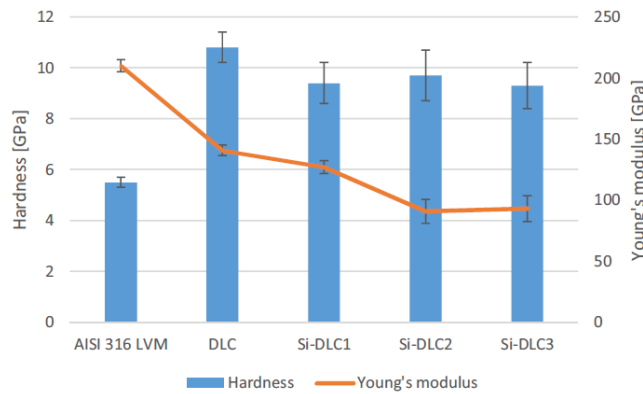
Şekil 7. Farklı yüklerde DLC filmlerin aşınma oranı [18]

Silisyum katkılı elmas benzeri karbon (Si-DLC) kaplamalar, çok hedefli bir DC-RF magnetron sıçratma tekniği kullanılarak AISI 316LVM paslanmaz çelik taban malzeme üzerine biriktirme işlemi yapılmıştır. Si'nin karbon kaplamaya katılması, RF magnetron'un 20 W (Si-DLC1), 40 W (Si-DLC2) ve 60 W (Si-DLC3) güçlerle birlikte püskürtme ile nanokompozit sentezinin yirminci dakikasından başlamıştır. Tablo 2'de verilmiştir [19].

Tablo 2. Si hedef tabancaya uygulanan farklı RF püskürtme güçleri altında sentezlenen DLC ve Si-DLC kaplamalarının XPS yüzey kimyasal bileşimi [19]

Sample	RF Power [W]	Element content [at.%]			
		O	N	C	Si
DLC	0	17,95	2,21	79,85	-
Si-DLC1	20	21,52	2,07	72,63	3,79
Si-DLC2	40	25,89	1,65	63,18	9,28
Si-DLC3	60	27,08	1,12	57,13	16,19

Sert taban malzemesine (AISI 316 LVM) kıyasla sertliğin iyileştirilmesi gözlenmiştir. DLC ve Si-DLC kaplamaları için Young modülünün sertlik ölçümleri ve değerlerinin sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. DLC ve Si-DLC kaplamalar, bir taban malzemesinde yaklaşık 2 kat daha fazla sertlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Sertlik seviyesinin saf DLC için 10.8 GPa' dan yaklaşık silisyum katkılı kaplamalar için 9.4 GPa' ya kadar azaltmasına rağmen, daha yüksek miktarda Si katılmasıyla filmin taban malzemeye yapışmasının da birlikte arttığı görülmüştür. Elastisite modülü, sıçratma teknikleriyle üretilen Si-DLC kaplamaları ile ilgilidir. Saf DLC filminin Young (Elastisite) modülü 200-225 GPa aralığında olduğu çıkmıştır. Young modülü (H / E oranı), kaplama tahribatına yol açan elastik deformasyonla bağlantılıdır, bu nedenle, kaplamanın yüklerinin dayanma kabiliyeti ile bağlantılı olmasıyla ilişkilidir. H^3/E^2 oranı, kaplamanın plastik deformasyona karşı direncini gösterir. Bu parametrenin artışı, taşıma kapasitesinin geliştirilmesine yol açmıştır [19].



Şekil 8. Sertlik değerleri ve Young modülünün paslanmaz çelik taban malzemesi, saf DLC ve çeşitli Si içeriğiyle Si-DLC kaplamaların karşılaştırılması [19]

Si-DLC1 ve Si-DLC2 numuneleri için kritik yükte filmlerin yapışmasında görünmez değişiklikler vardı. Si-DLC2 için filmin yapışmasında hafif şekilde azalma gözlenmiştir. Daha yüksek silisyum içeriği (yani Si-DLC3) ile DLC filminin ortalama yapışma değeri, diğer tipte numuneler için kaydedilenlerden % 30 daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Si-DLC3 durumunda, yapışmanın iyileştirilmesi, kaplamadaki gerilmenin azalmasına neden olabilir. İncelenen bu DLC kaplama numunelerinin bakteri yapışması sayısına bakıldığında, DLC ile kaplanması durumunda en düşük sayıda bakteri hücresi gözlenmiştir. En yüksek canlı ve ölü bakteri sayısı Si-DLC üzerinde gözlenmiştir. DLC kaplaması silisyum ile katkılandırma yapılarak bu kaplamanın kaplamasız taban malzemesi (AISI316 LVM) ile kıyaslandığında biyolojik tepkinin bozulmadığı görülmüştür [19].

4. DLC FİMLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞI

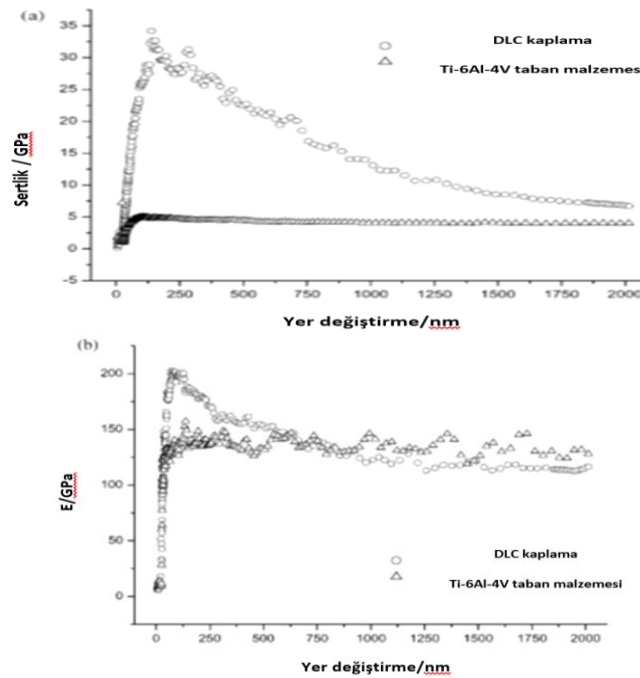
Günümüzde, aşınma direncine ilişkin yapılan araştırmalar protez başarısızlıklarının nedeni olarak yükün etkisinde ana eklem yüzeyinde ve farklı Young modülüne sahip metal ve kemik ara yüzeyinde aşınma kalıntılarının ortaya çıkmasını göstermektedir. Bu yüzden, aşınmanın azaltılması bu

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

amaçla DLC kaplama uygulamaları önemlidir [7]. DLC kaplamalar özellikle ortopedik implantlarda aşınma direncinin artırılması ve iyon salınımının engellenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Biyomedikal alanda yapılan çalışmalarda çeşitli aşınma mekanizmaları tanımlanmıştır. Bunlar; Yapışma(adhesive) aşınma, aşındırıcı(abrasive) aşınma, oksidatif aşınma, korozyon aşınması, plastik deformasyon ve yorulma aşınması gibi. Çalışılan ortam şartlarına bağlı olarak bir veya birkaçı bir arada görülebilir. Biyomedikal alanda uygulanan kaplamalar sayesinde sürtünmenin azaltılması hedeflenmektedir. DLC kaplama sürtünmeyi önemli ölçüde azaltabilen önemli bir kaplamadır [22].

Ti6Al4V alaşımından taban malzemesi r.f kaynaklı plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile DLC kaplama yapılarak kazımalı aşınma davranışı incelenmiştir. Şekil 2'de sertlik uç hareketine bağlı olarak Ti alaşımı ve DLC kaplamada sertlik ve elastiklik modülleri incelenmiştir. Sertlik ve elastik modülü, ilk aşamada, sırasıyla yaklaşık 34 ve 200 Gpa' da, daha sonra keskin bir şekilde düştüğü gözlenmiş ve son olarak kaplamasız taban malzemeye çok yakın hale geldiği (yaklaşık 5 ve 140 GPa) görülmüştür. İlk aşamadaki değerlerin yüksek olmasının sebebi nemden dolayı yüzeyde su adsorbsiyonu, filmin yüzey pürüzlülüğü, aşındırıcı uç ve numune yüzeyinin elastik deformasyonu gibi faktörlere dayandırılmaktadır. 200-300 nm arasında değişen derinliklerde yani kaplama kalınlığının onda birinde Maksimum sertlik ve elastik modül değerleri görülmekte olup, başlangıçta sertlik ve elastiklik modülü üzerinde taban malzemenin etkisi göz ardı edilebilmektedir [10]. Yüksek sertlik ve elastiklik modülü kaplamanın sp^3/sp^2 oranının yüksek olmasına dayandırılmaktadır.

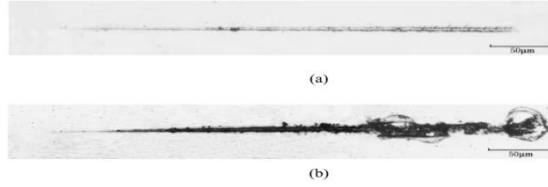


Şekil 2. Sertlik ucunun hareketine bağlı olarak Ti alaşımı ve DLC kaplama için elde edilen(a) sertlik ve (b) elastik modülü değerleri [10]

Şekil 3'te Ti alaşımı ve DLC kaplama yüzeyinde elde edilen çizik izi görülmektedir. Şekil 3a'da 200 mN yükte uygulanan çizik testinde çizik izinin balık kemiğine benzediği ortaya çıkmaktadır. Başlangıçtan yük 60 mN değerine ulaştığı bölgede elastik kazanımdan dolayı izin son derece düzgün olduğu kaplamada deformasyon oluşmadığı, yük arttıkça Çizik 600 nm derinliğine kadar indiğinde izin her iki tarafında, küçük ince çatlakların olduğu görülmektedir. Şekil 3 b'de yük miktarı 400 mN uygulandığında çizik izinde üç farklı bölge ortaya çıkmaktadır. Birinci bölgede elastik temas olup herhangi bir çatlak görülmemektedir. Orta kısımda Yük artışıyla ucun dalma derinliği 1400 nm ye kadar artmış bu ise balık kemiğine benzeyen izin genişlemesine sebep olmuştur. Ancak tarama sırasında ulaşılan iz derinliği, kaplama kalınlığının sadece yarısıdır ve bu durumda ara yüzde elastik

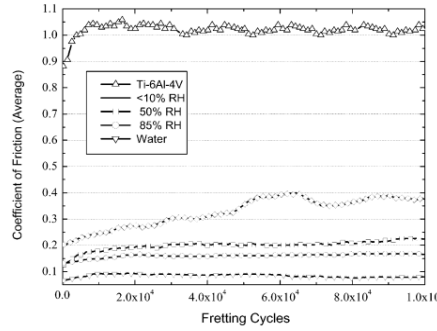
BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

kazanımdan dolayı hasarın meydana gelmediği ortaya çıkmaktadır. Çizik izinde ileri üçüncü aşamada daha büyük dalgalanmalar olup kırılma oluştuğu, kaplamanın soyulduğu gözlenmiştir [10].



Şekil 3. (a) 200 mN ve (b) 400 mM maksimum yükte DLC kaplama yüzeyinde oluşan çizik hasarının optik mikroyapı görüntüsü [10]

Şekil 4, taban malzemeye göre DLC kaplamalarda önemli ölçüde sürtünme katsayısının azaldığını göstermektedir. Su ortamında sürtünme katsayısı en düşük değerine ulaşmaktadır. DLC kaplamalar düzgün yüzeylere iyi yapışma kabiliyetine sahip olmakla birlikte yük artışına bağlı olarak yüzeylerde aşınma meydana gelmiştir. Yüzeyin aşınması, yüzey sertliğinin artırılması ve temas yüzeyinin sürtünme katsayısının azaltılması ile azalmaktadır. Su ortam şartlarında sürtünme katsayısının 0.1'in altına indirilebilmesi vücut sıvılarında kaplamaların daha iyi çalışabileceğini göstermektedir [10].

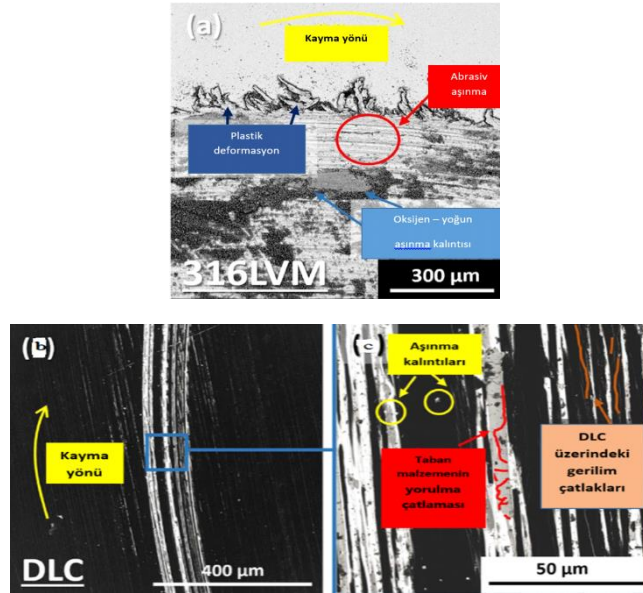


Şekil 4. DLC kaplama ve Ti alaşımının farklı ortamlarda(nemli hava) sürtünme katsayıları [10]

316L medikal paslanmaz çeliklerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için DLC kaplama PACVD (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme) tekniği ile biriktirilmiştir. Kaplamasız 316L paslanmaz çelik taban malzemesinin yüzey pürüzlülük değeri ($R_a = 0.150 \mu m$) ve nano sertlik değeri ($6.75 \pm 0.73 \text{ Gpa}$) ölçülmüştür. DLC ile kaplanmış 316L paslanmaz çelik taban malzemesinin yüzey pürüzlülük değeri ($R_a = 0.159 \mu m$) ve nano sertlik değeri ($47.77 \pm 9.86 \text{ Gpa}$) ölçülmüştür. DLC film kaplanmış taban malzemenin sertlik değerinde göze çarpan bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Kaplamasız 316L çeliği taban malzemesi için ortalama sürtünme katsayısı (0.82 ± 0.03) ölçülürken, DLC ile kaplanmış taban malzemesi için ortalama sürtünme katsayısı (0.15 ± 0.02) değerine düşmüştür. Bu değerler, kuru aşınma testi sırasında sürtünme kuvvetlerinin DLC filmlerinin biriktirilmesinden sonra önemli ölçüde azaldığını dolayısıyla sürtünme katsayısının da azaldığını göstermektedir. Buna bağlı olarak DLC kaplamada aşınma oranı önemli ölçüde azalmıştır. Aşınma oranı 316 L paslanmaz çelikte $1.87 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ değerinde iken DLC kaplamadan sonra $1.56 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, değerine düşerek çok önemli bir fark ortaya koymuştur. Şekil 5'te görüldüğü gibi aşınma kaplamasız ve kaplamalı taban malzemeler üzerinde farklıdır. Şekil 5a' da kaplamasız 316L çeliği taban malzemesinde ciddi aşınma gözlenmiştir. Aşınma mekanizmaları bazı bölgelerde plastik deformasyon bazı bölgelerde abrazyon aşınma şeklindedir. Aşınma ile oluşan siyahımsı oksitlenmiş aşınma kalıntıları aşınma yoluna yapışır ve yığılma eğilimi gösterir. Şekil 5b ve 5c'de DLC ile kaplanmış 316L çeliği taban malzemesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde, DLC kaplamanın alt tabakadan çok küçük parçacıklar şeklinde ayrılarak sürülme(ploughing) şeklinde aşındığı görülmektedir. filmin taban malzeme ile birlikte plastik olarak deforme olduğunu göstermektedir. Siyah alanlar DLC kaplamasının olduğu bölgelerdir. Görüldüğü gibi, kaplamanın bir miktarı taban malzemesinden ayrılmış ve bilye-disk temas bölgesinde aşındırıcı işlev görmüştür. Çizme testlerinde

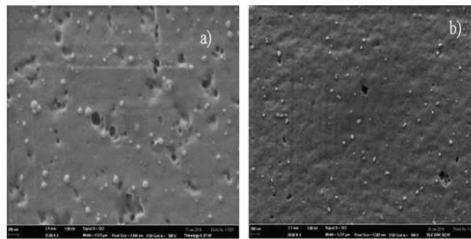
BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

gözlenerlere benzer şekilde gerilme çatlakları, sürtünme sonucu ortaya çıkmıştır. Maruz kalan taban malzemenin ayrılan bölgelerinde yorulma çatlakları mevcut olmasına rağmen DLC filmi iyi yapışma ile tanımlanabilir. DLC filmleri, 316L medikal paslanmaz çeliklere göre çok az aşınma gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Kaplamanın H/E oranı (sertlik/elastiklik modülü) ile kaplamanın elastiklik modülünün taban malzemenin elastiklik modülüne oranı aşınma oranını önemli ölçüde etkilemektedir. DLC kaplamalar daha yüksek H/E oranı ve daha düşük $E_{Kaplama}/E_{Taban}$ malzeme oranı ile karakterize edilmektedir. Bu ise aşınma direncinin çok iyi olmasını sağlamaktadır [9].



Şekil 5.10 N yük altında toplam 2500 m sürtünmeden sonra elde edilen 316LVM (a), ve DLC (b) - (c) için aşınmanın SEM fotoğrafları [9]

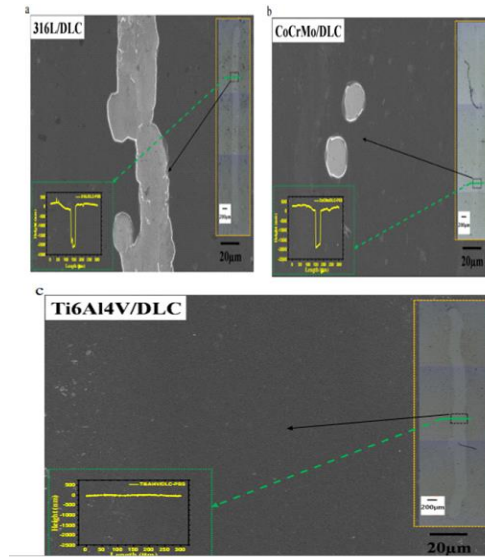
Kompleks şekilli yüzeylere uygulanabilen biyouyumlu DLC kaplamalar sürtünme katsayısını 0.1 değerine kadar düşürebilmektedir. Aşınmayı belirlemek aşınma bölgesinin morfolojisi dikkate alındığında DLC kaplamaların önemli bir tribolojik performans sağladığı ortaya çıkmaktadır. Şekil 6b'de aşınma hasar oranlarının ve büyüklüklerinin azalması kaplama ile önemli bir fark oluştuğunu göstermektedir [2].



Şekil 6. Aşınma yüzey morfolojisi a)CoCr/seramik b)Ta-C/seramik [2]

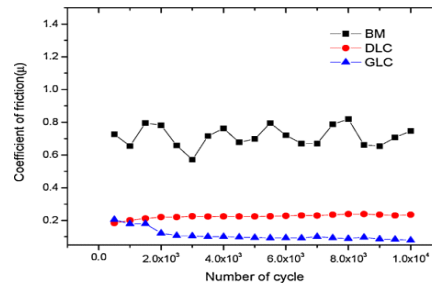
Paslanmaz çelik, CoCrMo alaşımı ve titanyum alaşımı, protez ve implantlar için en çok kullanılan metal malzemelerdir. Bunlar üzerine uygulanan DLC kaplamalar aşınma direncini artırmakla birlikte DLC kaplamasının farklı metal taban malzemeler üzerindeki etkisi farklı olabilmektedir. Kaplamanın taban malzemeye yapışma kabiliyeti aşınma direncini önemli derecede artırmaktadır. Şekil 7 incelendiğinde Ti alaşımı üzerinde elde edilen DLC kaplamanın yapışma kabiliyeti diğerlerinden daha iyi olduğu için delemantasyon (soyulma) diğerleri gibi göstermemiş ve en iyi aşınma direncini ortaya koymuştur [4].

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ



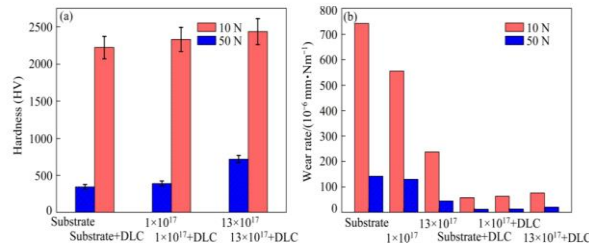
Şekil 7. 2 N yük altında aşınma izlerinin SEM görüntüleri (a) 316L/DLC, (b) CoCrMo/DLC, (c) Ti6Al4V/DLC [4]

Kalça ve diz implantları sürtünmeye neden olabilecek kayma hareketlerine maruz kalmaktadır. Ti alaşımları önemli biyomedikal malzeme olmakla birlikte aşınmaya maruz kalmaktadır. DLC kaplama bu alaşımın sürtünme katsayısını azaltmada çok etkili olmaktadır. Şekil 8 'de görüldüğü gibi DLC kaplama Ti alaşımı ana malzemeye göre çok düşük sürtünme katsayısı göstermiştir. DLC kaplanmış Ti alaşımında sürtünme katsayısı 0.2 iken GLC grafit benzeri karbon kaplamada paralel olmakla birlikte temas noktasından dolayı 0.1 gibi daha düşük sürtünme katsayısı göstermektedir [3].



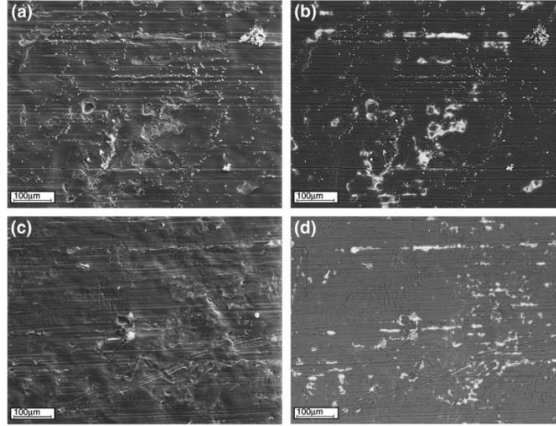
Şekil 8. Ti alaşımı, DLC kaplama ve GLC(grafit benzeri karbon) kaplamanın sürtünme katsayısı değişimleri [3]

Şekil 9'da Ti6Al7Nb alaşımına DLC kaplama uygulaması yapıldığında aşınma direncinin iyileştiği görülmektedir [23].



Şekil 9. Ti6Al7Nb alaşımının ve DLC kaplanmış alaşımın a) sertlik değerleri b)suni tükürük içerisinde aşınma oranları [23]

Şekil 10' da DLC kaplamaya katılan Si katkı oranının kaplamanın aşınma direncini nasıl iyileştirdiğini göstermektedir. Si katkı oranının artması ile kütle kayıpları 36 mg değerinden 3 mg değerinin altına düşmektedir. Kaplanmamışta bu değer 56 mg olup kaplamanın aşınma direncini iyileştirdiğini göstermektedir [24].



Şekil 10. SEM görüntüleri a-c. ikincil elektron b-d. geri saçılan electron görüntüleri a-b. DLC kaplanmış Si_2 katkı, c-d. DLC kaplanmış Si_4 katkı kaplamaların görüntüleri [24]

5. SONUÇLAR

Biyomedikal alanda kullanılan implant malzemelerinin uzun ömürlü olması ve kullanım sürelerinin artırılması önemlidir. Elmas benzeri bir karbonun (DLC) kaplamalar, medikal malzemelerin kaplama uygulamalarında mükemmel mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. DLC kaplamaların yapısal, mekanik özellikleri, kaplama yapılırken çalışma parametrelerinin kontrolü ile önemli derecede değiştirilebilmektedir. DLC'nin mikroyapısı içerisinde artan sp^3 artışıyla filmin yoğunluğu ve buna bağlı olarak sertliği artarken, yapı içinde artan sp^2 ve azalan yoğunlukla birlikte sertliğin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, DLC filmlerde taban malzeme gerilimi arttıkça sertlik düşmektedir. DLC kaplamalar birçok yüzeyde düşük sürtünme sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. Elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar, biyo-uyumluluk nedeniyle potansiyel biyomedikal kaplama olmaya adaydır. Metal ilavesinin ve düşük altlık taban malzeme geriliminin seçilmesinin sertliği arttırmada etkisi olmuştur. Daha düşük bir sürtünme katsayısının veya daha yüksek bir sertliğin gerekli olduğu durumlarda, DLC yüzey kaplaması için avantajlıdır. PVD (fiziksel buhar biriktirme) tekniğinden katodik ark buharı biriktirme ve magnetron sıçratma tekniğiyle, metal katkılı DLC kaplamalarda kullanılmaktadır.

İmplant üzerine yapılan kaplama uygulamaları, aşınmaya karşı direnci artırarak vücut içinde daha uzun ömürlü olmasını ve daha uyumlu çalışabilmesini sağlamaktadır. Kaplamanın aşınma davranışı kaplama yöntemine, deney parametrelerine ve filmin içine katılan katkı oranlarına bağlıdır. Bu kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri, kaplama yapılırken çalışma parametrelerinin kontrolü ile önemli derecede değiştirilmektedir. Kaplama için en önemli sorun yüzey gerilmelerinin oluşmasıdır. Taban malzeme ile kaplama arasında oluşan yüksek gerilmeler plastik deformasyondan dolayı çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Kaplama üzerinde kayma hareketi boyunca, kazınma, adeziv aşınma, çatlak oluşumu ve abrazyon aşınma tipleri görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü DLC kaplamaların tribolojik davranışını etkilemiştir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça DLC kaplı malzemelerin aşınmasının da arttığı görülmüştür. DLC kaplamalar medikal alanda sürtünme katsayısını düşürerek kaplamaların aşınma direncini artırmaktadır.

Bütün bu araştırmalar, ilerleyen zamanlarda sağlık alanında kullanılan medikal malzemelerin üzerinde DLC kaplamaların etkisinin daha fazla olacağını göstermektedir. DLC kaplamalar kullanılarak insan vücuduyla daha uyumlu, implantın kullanım yerinde sorun yaratmayan, uzun süreli

kullanılabilen ekonomik ürünler geliştirilmesi sağlık sektörü adına umut verici gelişmeleri oluşturacaktır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Grill A.,Diamond-likecarboncoatings as biocompatiblematerials—an overview, *DiamondandRelatedMaterials*, Vol. 12, pp. 166–170, 2003.
- [2] Choudhurya D., Urban F., et al., A noveltribologicalstudy on DLC-coatedmicro-dimpledorthopedicsimplantinterface, *journal of themechanicalbehavior of biomedicalmaterials*, Vol.45, pp. 121–131, 2015.
- [3] Du D.,Liua D., et al., Frettingwearandfrettingfatiguebehaviors of diamond-likecarbonandgraphite-likecarbonfilmsdeposited on Ti-6Al-4V alloy, *AppliedSurfaceScience*, Vol. 313, pp. 462–469, 2014.
- [4] Zhang T. F.,Deng Q. Y., et al., Wearandcorrosionproperties of diamondlikecarbon (DLC) coating on stainlesssteel, CoCrMoand Ti6Al4V substrates, *Surface&CoatingsTechnology*, Vol. 273, pp. 12–19, 2015.
- [5] Huang L.,Xua K. et al., Nano-scratchandfrettingwearstudy of DLC coatingsforbiomedicalapplication, *DiamondandRelatedMaterials*, Vol. 10, pp.1448-1456, 2001.
- [6] Suzuki, A, Aiyama Y., et al., Frictionandwearcharacteristics of hydrogenateddiamond-likecarbonfilmsformed on theroughenedstainlesssteelsurface, *Wear*, Vol. 269, pp. 118–124, 2010.
- [7] Aytutuldu N., Titanyum Yüzeyley Üzerindeki Elmas Benzeri Karbon Kaplamanın Mikrobiyolojik ve Biyokimyasal Açıdan Etkinliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2009.
- [8] Liao T. T.,Zhang T. F., et al., Biologicalresponses of diamond-likecarbon (DLC) filmswithdifferentstructures in biomedicalapplication, *MaterialsScienceandEngineering*, Vol. C 69, pp. 751–759, 2016.
- [9] Pieniak D.,Łepicka M., et al.,Effect of mechanicalproperties of substrateandcoating on wearperformanceof TiN- or DLC-coated 316LVM stainlesssteel, *Wear*, Vol. 382-383 pp. 62-70, 2017.
- [10] Huang L.,Xua K. et al., Nano-scratchandfrettingwearstudy of DLC coatingsforbiomedicalapplication, *DiamondandRelatedMaterials*, Vol. 10, pp.1448-1456, 2001.
- [11] Bordin D.,Coelho P. G., et al., Theeffect of DLC-coatingdepositionmethod on thereliabilityandmechanicalproperties of abutment'sscrews, *DentalMeterials*, Vol. 30, pp. 1-10, 2018.
- [12] M. MADEJ, Theeffect of TiNandCrNinterlayers on thetribologicalbehavior of DLC coatings, *Wear*, Vol. 317, p. 179-187, 2014.
- [13] Arın T., Yüzey Kaplamalarda Nilüfer Etkisi ve Uygulamaları, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, Metalurji Sayı:177 Aralık 2015.
- [14] Danışman Ş., Ti6Al4V Alaşımının Korozyon Davranışı ve İslanabilirliği Üzerine İnce Film Kaplamaların Etkisi, ISIMSIT 2017 2-4 Kasım 2017 TOKAT, sayfa 302-303 Abstract kitabı.
- [15] Danışman Ş, Savaş S,Bendeş O,Investigation of WearPerformanceandWettabilityProperties of SurfaceCoated M2 Tool Steel Tribology (BalkanTRib'17), Cappadocia/TURKEY, sayfa:764-773, 13-15 September 2017.
- [16] Erbaş İ. S., “Karbon Esaslı Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İatanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

BİYOMEDİKAL ALANDA PVD KAPLAMANIN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

[17] Wei Z., Tribological properties of DLC films prepared by magnetron sputtering, *Physics Procedia*, Vol. 18, pp. 274–278, 2011.

[18] Karabağlar D., Süper kaygan Özellik Gösteren Elmas Benzeri Karbon Nanopartikülleri ile Kaplanmış Ortodontik Tel, Konvansiyonel Braket ve Kendinden Bağlanan Braket Kullanımının Diş Hareketinde Sürtünmeyi Azaltıcı Etkisinin Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.

[19] Wua Y., Zhou S., et al., Comparative corrosion resistance properties between (Cu,Ce)-DLC and Ti co-doped (Cu,Ce)/Ti-DLC films prepared via magnetron sputtering method, *Chemical Physics Letters*, vol. 705, pp. 50–58, 2018.

[20] Danışman Ş., Odabas D., Teber M., The Effect of Coatings on the Wear Behavior of Ti6Al4V Alloy Used in Biomedical Applications, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 295(2018) 012044 doi:10.1088/1757-899X/295/1/012044, IOP Publishing pp.1-12, 2018.

[21] Dalibon E. L., Escalada L. et al., Mechanical and corrosion behavior of thick and soft DLC coatings, *Surface & Coatings Technology*, Vol 312, pp.101–109, 2017.

[22] Q. Jane Wang, Dong Zhu, and Jian Cao, Chapter 22, *Tribology and Surface Engineering: Scientific and Technological Bases for Energy Efficiency*. pp. 575-607, 2013.

[23] Zheng X., Zhang Y., Zhang B., Effect of N-ion implantation and diamond-like carbon coating on fretting wear behaviors of Ti6Al7Nb in artificial saliva, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 27, pp. 1071–1080, 2017.

[24] Jones B. J., Mahendran A., et al., Diamond-like carbon coating of alternative metal alloys for medical and surgical applications, *Diamond & Related Materials*, Vol. 19, pp. 685–689, 2010.